

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE
M.Eng.

PAR
LORRAIN, Karine

ANALYSE DES APPORTS HORIZON 2050 POUR
LES BASSINS CHURCHILL FALLS, MANIC-5 ET CANIAPISCAU

MONTREAL, LE 16 JUILLET 2007

© Karine Lorrain, 2007

PRÉSENTATION DU JURY – MÉMOIRE

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE

M. Robert Leconte, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. François Brissette, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Frédéric Monette, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Luc Roy, membre du jury
Hydro-Québec

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 14 JUIN 2007

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est dédié à tous ceux qui ont cru en moi et qui m'ont encouragée à terminer ma maîtrise.

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche Robert, qui a été capable de supporter mes humeurs changeantes et mon découragement lors des périodes plus difficiles. Depuis le début de mon baccalauréat, il m'a donné la chance de travailler pour le DRAME et a démontré une confiance inconditionnelle en mes capacités et talents. Je lui dois beaucoup.

Je remercie également mon co-directeur de recherche qui m'a beaucoup conseillée et pris le temps d'analyser avec moi certains problèmes de simulation. Je dois donner une mention spéciale aux gens d'Ouranos, particulièrement Georges, qui a été mon mentor durant quelques mois. Il m'a permis de parfaire mes connaissances et de développer mon esprit critique. Merci à toi, Georges!

J'aimerais ensuite remercier mon conjoint, mes parents et ma sœur qui m'ont aimée tel que je suis et qui ont toujours été fiers de moi, peu importe les décisions que j'ai prises. François, merci pour ton intransigeance. Grâce à ton soutien, j'y suis arrivée.

Avec un emploi à temps plein et une nouvelle maison à entretenir, il est difficile de trouver l'énergie pour achever un mémoire. Je veux donc remercier mon employeur qui m'a permis une flexibilité dans mon horaire afin d'avoir quelques heures de plus destinées à travailler sur mes analyses hydrologiques. Je veux également remercier mes amis qui ont compris pourquoi je me suis absentée de quelques sorties pour travailler.

J'ai été très stressée et exténuée, mais j'ai enfin obtenu un repos bien mérité.

ANALYSE DES APPORTS HORIZON 2050 POUR LES BASSINS CHURCHILL FALLS, MANIC-5 ET CANIAPISCAU

LORRAIN, Karine

SOMMAIRE

Les changements climatiques font l'objet d'une attention particulière auprès de la communauté scientifique internationale. En effet, des recherches sont réalisées afin d'évaluer la probabilité que ces derniers causent des répercussions déterminantes sur l'avenir des générations futures. Comme exemple de recherche, certaines études consistent à déterminer les impacts causés par des perturbations sur les ressources naturelles, notamment en ce qui a trait à l'eau. Cette présente étude porte sur une représentation générale des apports d'eau futurs pour trois réservoirs appartenant à Hydro-Québec, situés au nord du Québec. Ces derniers influencent grandement la production d'énergie hydroélectrique et la prévision de leur approvisionnement aidera amplement à une amélioration de la gestion des réserves en eau pour prévenir les événements extrêmes saisonniers provoqués par les variations météorologiques.

Cette recherche est divisée en trois étapes. Le but visé de la première étape consiste à simuler les apports futurs de ces réservoirs par l'utilisation du modèle hydrologique HSAMI d'Hydro-Québec. Le processus consiste d'abord à ajouter aux données climatiques des bassins (précipitation, température maximale et minimale) une variation mensuelle produite par des modèles climatiques globaux. L'emploi de 16 scénarios de cinq modèles climatiques a permis d'analyser les tendances saisonnières des débits, telle que la crue printanière ou la période d'étiage en été. De plus, ces scénarios permettent de visualiser l'occurrence de ces phénomènes, en comparaison avec les données historiques. Les essais se sont principalement concentrés sur l'interprétation des apports d'eau futurs lors de l'horizon 2050, soit entre 2040 et 2069. Les résultats des simulations démontrent d'abord une tendance à la précocité de la crue printanière. De plus, son apport est en moyenne inférieur à celui observé. Cette situation s'explique entre autres par une forte hausse de l'évapotranspiration potentielle durant la saison printanière provoquée par une température plus chaude. On remarque également une période d'étiage plus accrue durant l'été et l'automne, et une quantité d'eau supérieure durant la saison hivernale.

La seconde étape de cette étude consiste à vérifier l'efficacité d'un générateur de climat dans la modélisation des apports prévisionnels des réservoirs. En effet, cet outil permet de produire des séries synthétiques des variables climatiques sur de longues périodes. En ajoutant aux données observées des variations mensuelles d'un scénario d'un modèle climatique global, il est possible de simuler plusieurs séries de données statistiquement identiques mais de variations journalières différentes. L'utilisation de ce générateur de climat expérimental a permis d'invalider l'hypothèse que les résidus des températures maximales et minimales suivent une loi normale. En fait, la problématique est que la

génération de ces variables repose sur cette théorie et que les calculs ont été conçus comme tels. Pour améliorer leur simulation et rendre l'hypothèse de départ vraie, une transformation Box-Cox a été employée. En comparant les séries synthétiques produites par cette approche et celles générées selon la technique originale, on remarque une amélioration de la représentativité de ces variables, surtout pour les températures minimales. L'utilisation du test Kolmogorov-Smirnov comme outil de comparaison a permis ces constats. Des recherches restent encore à faire sur cette nouvelle procédure, surtout en ce qui a trait à la simulation de température maximale inférieure à la température minimale pour un temps donné.

La dernière étape de cette étude a permis de comparer les apports provenant des séries synthétiques du générateur de climat original avec ceux générés par les données observées pour le bassin de Churchill Falls. Selon les résultats obtenus, le générateur de climat contribue à amplifier considérablement la quantité d'eau maximale émergeant lors de la période de fonte de la neige au printemps. Des écarts, d'une valeur excédant 1000 m³/s (pour le bassin de Churchill Falls), sont effectivement produits par l'utilisation du générateur WeaGETS. Pour analyser cette différence statistique, divers essais ont été réalisés. La première expérience a été de comparer chaque hydrogramme annuel dans son ensemble, autant pour les apports réels, reconstitués et simulés. Cet essai a permis d'interpréter leur tendance statistique et ainsi déduire que les hydrogrammes simulés présentent moins de dispersion entre eux d'une année à l'autre. La deuxième expérience a été d'évaluer la source du problème de reproduction de la crue synthétique. Après comparaison des écarts-types des trois variables climatiques utilisées (précipitation, température maximale et minimale), on remarque une moins grande dispersion des valeurs de températures minimales simulées par rapport aux données observées. De ce fait, on peut affirmer que le générateur de climat semble avoir de la difficulté à reproduire les extrêmes pour les températures minimales. Afin de prouver cette affirmation, deux séries hybrides ont été réalisées. La première a été constituée des données de températures observées et des valeurs de précipitations simulées. L'hydrogramme créé par l'emploi de cette série présente une grande similarité avec celui produit avec les données observées. Le deuxième essai a été réalisé par la combinaison des températures simulées avec les précipitations observées. L'hydrogramme engendré après utilisation du modèle HSAMI démontre effectivement que les séries de températures synthétiques influencent grandement l'amplitude de la crue printanière.

Comme autre expérience de cette dernière étape, le générateur modifié avec Box-Cox a été employé. Encore une fois, l'hydrogramme produit avec les séries synthétiques présente une crue (pointe) beaucoup plus importante que celle présentée avec les apports reconstitués. Toutefois, après avoir réalisé les mêmes analyses que pour le générateur de climat original, on constate que les résultats semblent améliorer la représentativité des séries reconstituées. En effet, bien que les valeurs soient toujours aussi grandes, la dispersion des variables est mieux reproduite.

Enfin, des données climatiques représentant l'horizon 2050, créées avec WeaGETS/Box-Cox, ont servi pour comparer l'hydrogramme qui s'ensuit avec celui résultant de l'ajout des deltas mensuels du modèle HadCM3a aux données observées. On remarque que l'hydrogramme simulé avec WeaGETS respecte la précocité de la crue reconstituée horizon 2050, mais non la quantité d'eau prévue. En utilisant les mêmes analyses que précédemment, on constate que la non représentativité des températures minimales a un impact considérable sur les résultats. Ainsi, ces expériences ont permis de comprendre la source du problème et d'affirmer que la transformation de Box-Cox ne peut à elle seule le résoudre.

Mots-clés : générateur de climat, hydrologie, bassin versant, Box-Cox, température

ANALYSIS OF HORIZON 2050 SUPPLIES TO THE CHURCHILL FALLS, MANIC-5 AND CANIAPISCAU BASINS

LORRAIN, Karine

SUMMARY

Climate changes have been the subject of a particular scrutiny by the international community. Indeed, research are conducted to assess the probability they are the cause of determining repercussions on the future of generations to come. As a research example, certain studies consist in establishing impacts that could generate drastic disturbances on natural resources, especially water. This study specifically establishes a general representation of future supplies to three reservoirs owned by Hydro-Québec and located in Northern Québec. They largely influence the production of hydroelectric power and the planning of their supply will greatly help improve water reserve management in order to prevent extreme seasonal events provoked by meteorological variations.

This research is divided into three phases. The goal aimed by the first experiment is to simulate future supplies to these reservoirs by the use of Hydro-Québec's HSAMI hydrological model. The process first consists in adding to the basins' climate data (precipitations, maximum and minimum temperatures) a monthly variation produced by global climate models. The use of 16 scenarios from 5 climate models has allowed the analysis of seasonal flow trends, such as spring flood or summer low-water period. Furthermore, these scenarios help to visualize the occurrence of these phenomena in comparison with historical data. Tests have mainly concentrated on the interpretation of future supplies during horizon 2050, that is between 2040 and 2069. Simulation results first demonstrate a tendency to precocious spring flood. Furthermore, its supply is on average inferior to the observed supply. This situation is explained, among others, by a strong increase of potential evapotranspiration during the spring season, provoked by warmer temperatures. We also notice a more heightened low-water period during the summer and fall and a superior quantity of water during the winter season.

The second phase of the study consists in verifying the efficiency of the climate generator in the modelling of planned reservoir supplies. Indeed, this tool allows the production of synthetic series of climate variables over long periods. By adding monthly variations generated by a global climate model scenario to observed data, it is possible to simulate several series of statistically identical data, but with different daily variations. The use of this experimental climate generator has allowed to notice a more or less accurate speculation, that is, to confirm that maximum and minimum temperature residues follow a normal distribution. In fact, the issue is that the generation of these variables lies on this theory and that calculations have been designed as such. To improve their simulation and make the starting hypothesis true, a Box-Cox

transformation has been used. By comparing synthetic series produced by this approach and those generated according to the original technique, we notice an improvement of the representativeness of these variables, especially for minimum temperatures. The use of the Kolmogorov-Smirnov test as a comparison tool has allowed these observations. There are still research to be conducted on this new procedure, specifically concerning the simulation of maximum temperature inferior to minimum temperature for a given period.

The last phase of this study has been to compare supplies coming from the original climate generator's synthetic series to those generated by data observed for the Churchill Falls basin. According to results, the climate generator contributes to considerably amplifying the maximum quantity of water emerging during the spring snow melting period. Differences, of a value exceeding $1\,000\text{ m}^3$, are effectively produced by the use of the WeaGETS generator. To analyze this statistical difference, various tests have been conducted. The first experiment has been to compare each annual hydrograph in its ensemble, both for real, reconstructed and simulated supplies. This test has allowed the interpretation of their statistical tendency and thus deduce that simulated hydrographs present less dispersion between them year after year. The second analysis was to evaluate the source of the synthetic flood reproduction problem. After comparison of standard differences for the three climate variables used (precipitations, maximum and minimum temperatures), we notice a less significant dispersion of simulated minimum temperature values compared to observed data. Therefore, we can assert that the climate generator seems to have difficulty to reproduce extremes for minimum temperatures. In order to prove this assertion, two hybrid series have been produced. The first is constituted of observed temperature data and simulated precipitation values. The hydrograph created by the use of this series presents great similarities with the hydrograph produced with observed data. The second test has been conducted using a combination of simulated temperatures and observed precipitations. The hydrograph generated after the use of the HSAMI model effectively demonstrates that the synthetic series of temperatures greatly influence the amplitude of spring floods.

As another experiment, the Box-Cox modified generator has been used. Once more, the hydrograph produced with the synthetic series presents a far more important flood than the one presented with reconstructed supplies. However, after having conducted the same analyses performed for the original climate generator, we notice that results seem to improve the representativeness of reconstructed series. Indeed, even though values are still high, the dispersion of variables is better reproduced.

Finally, climate data representing horizon 2050, created with WeaGETS/Box-Cox, have been utilized to compare the hydrograph following the one resulting from the addition of the HadCM3a model's monthly deltas to observed data. We notice that the hydrograph simulated with WeaGETS respects the precociousness of the reconstructed horizon 2050 flood, but not the planned quantity of water. By using the same analyses as before, we note that the non-representativeness of minimum temperatures has a considerable impact

on results. Thus, these experiments have allowed understanding the source of the problem and asserting that the Box-Cox theory cannot solve it alone.

Key words: weather generator, hydrology, watershed, Box-Cox, temperature

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Répercussions des changements climatiques sur le régime hydrologique.....	5
1.2 Les modèles climatiques globaux	5
1.3 Les scénarios climatiques.....	6
1.4 La méthode de « downscaling »	7
1.4.1 Les méthodes empiriques/statistiques	10
1.4.2 Les méthodes statistiques/dynamiques	10
1.4.3 Les modèles climatiques régionaux	11
1.5 Les modèles hydrologiques.....	11
1.5.1 Les modèles empiriques.....	12
1.5.2 Les modèles conceptuels.....	12
1.5.3 Les modèles numériques à base physique.....	13
1.6 Les études réalisées	13
CHAPITRE 2 PRÉSENTATION DES BASSINS VERSANTS À L'ÉTUDE	17
2.1 Bassin de la rivière Churchill.....	18
2.2 Bassin de la rivière Manicouagan	20
2.3 Bassin de Caniapiscau.....	23
CHAPITRE 3 MÉTHODES EMPLOYÉES LORS DE L'ÉTUDE	25
3.1 Application des modèles climatiques globaux.....	25
3.1.1 Les scénarios climatiques.....	25
3.1.1.1 IS92	26
3.1.1.2 SRES	26
3.1.2 Sélection des modèles et scénarios dans le cadre de cette étude.....	31
3.1.2.1 HadCM3	35
3.1.2.2 CGCM2.....	35
3.1.2.3 CSIRO Mk2	36
3.1.2.4 CCSRNIES.....	36
3.1.2.5 ECHAM4 / OPYC3	37
3.2 Application des anomalies de précipitation et de température.....	37
3.2.1 Les variables climatiques	38
3.2.1.1 La théorie du « baseline »	38
3.2.1.2 Les horizons normalisés.....	38
3.2.2 Les algorithmes	39
3.2.3 Les problématiques et les limites	40
3.2.4 Application retenue	42

3.3	La modélisation hydrologique : utilisation de HSAMI.....	42
3.3.1	Description du modèle	44
3.3.2	Limites du modèle HSAMI.....	47
3.3.3	Calibrage et validation	48
3.3.4	Les stations climatiques employées	50
3.3.5	Interpolateur spatial : polygones de Thiessen	54
3.3.6	Superficie utilisée pour les maillages des modèles climatiques.....	57
3.4	Résumé de la procédure de modélisation.....	60
CHAPITRE 4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS		62
4.1	Résultats des modèles climatiques	62
4.2	Résultats des apports d'eau pour les bassins versants à l'étude.....	67
CHAPITRE 5 AMÉLIORATION DE LA PROCÉDURE DU GÉNÉRATEUR STOCHASTIQUE DU CLIMAT		75
5.1	Définition d'un générateur de climat	75
5.2	Application du générateur de climat WeaGETS.....	76
5.2.1	Conception originale	76
5.2.2	Les limites du modèle	81
5.2.3	Amélioration de l'approche théorique	83
5.2.4	Comparaison des générateurs de climat.....	89
5.3	Intégration des générateurs de climat dans la modélisation hydrologique	94
CHAPITRE 6 ANALYSE COMPARATIVE DES RÉSULTATS		95
6.1	Comparaison des anomalies.....	95
6.2	Comparaison des apports	97
CONCLUSION		113
RECOMMANDATIONS.....		115
ANNEXE I	MAILLAGE DES MODÈLES CLIMATIQUES SUR LA PROVINCE DE QUÉBEC	117
ANNEXE II	CALIBRAGE DES BASSINS DE MANIC 5 ET DE CANIAPISCAU POUR LE MODÈLE HYDROLOGIQUE HSAMI.....	123
ANNEXE III	EXEMPLE DE CALCULS ASSOCIÉ À LA SUPERFICIE UTILISÉE POUR LES MAILLAGES DES MODÈLES CLIMATIQUES.....	126
ANNEXE IV	ÉVOLUTION MENSUELLE DES ANOMALIES CLIMATIQUES.....	131

ANNEXE V	HYDROGRAMMES MOYENS DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES HORIZON 2050 POUR MANIC-5 ET CANIAPISCAU	135
ANNEXE VI	DELTAS DE PRÉCIPITATION, DE TEMPÉRATURES MAXIMALES ET MINIMALES POUR L'HORIZON 1980 DE L'ENSEMBLE DES SCÉNARIOS ET MODÈLES CLIMATIQUES.....	144
ANNEXE VII	HISTOGRAMMES DES RÉSIDUS DE TEMPÉRATURES MAXIMALES ET MINIMALES	148
ANNEXE VIII	LES ÉTAPES DE LA TRANSFORMATION BOX-COX DANS LE GÉNÉRATEUR DE CLIMAT.....	152
ANNEXE IX	RÉSULTATS DES SÉRIES SYNTHÉTIQUES POUR LE GÉNÉRATEUR DE CLIMAT ORIGINAL ET SELON LA TRANSFORMATION BOX-COX.....	155
BIBLIOGRAPHIE		158

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Échelles spatiales et temporelles usuelles	9
Tableau 3.1 Modèles et familles de scénarios.....	32
Tableau 3.2 Données statistiques des paramètres utilisés au calibrage et à la validation du bassin de Churchill Falls (1972-2002)	50
Tableau 3.3 Stations météorologiques utilisées pour le bassin de Churchill Falls	51
Tableau 3.4 Stations météorologiques utilisées pour le bassin de Manic-5.....	52
Tableau 3.5 Stations météorologiques utilisées pour le bassin de Caniapiscou	53
Tableau 5.1 Résultats du test Kolmogorov-Smirnov pour les séries de températures simulées avec WeaGETS original et modifié.....	91
Tableau 5.2 Nombre de tests acceptés pour la température maximale	93
Tableau 5.3 Nombre de tests acceptés pour la température minimale.....	93
Tableau 5.4 Nombre de jours moyen où la température maximale est inférieure à la température minimale	94

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 <i>Comparaison entre un MCG et le downscaling.</i>	9
Figure 2.1 <i>Localisation du bassin-versant de la rivière Churchill.</i>	19
Figure 2.2 <i>Installation hydroélectrique et localisation du réservoir Smallwood.</i>	20
Figure 3.1 <i>Familles de scénarios du SRES.</i>	28
Figure 3.2 <i>Évolution de la société selon divers scénarios du SRES.</i>	28
Figure 3.3 <i>Évolution temporelle des scénarios selon la quantité de CO₂.</i>	29
Figure 3.4 <i>Comparaison des scénarios IS92 et SRES.</i>	30
Figure 3.5 <i>« Forçages » intégrés dans les scénarios du modèle HadCM3.</i>	33
Figure 3.6 <i>Représentation graphique des « forçages » intégrés dans les scénarios du modèle HadCM3.</i>	34
Figure 3.7 <i>Schématisation du cycle hydrologique.</i>	43
Figure 3.8 <i>Concept des réservoirs en cascade pour HSAMI.</i>	45
Figure 3.9 <i>Comparaison de l'hydrogramme observé et simulé selon le calibrage choisi pour le bassin de Churchill Falls.</i>	49
Figure 3.10 <i>Localisation des stations climatiques et des trois bassins à l'étude.</i>	54
Figure 3.11 <i>Polygone de Thiessen.</i>	55
Figure 3.12 <i>Exemple type de patron météorologique</i>	57
Figure 3.13 <i>Organigramme des étapes de simulation</i>	60
Figure 3.14 <i>Organigramme des étapes de simulation pour le temps futur.</i>	61
Figure 4.1 <i>Anomalies annuelles de la température maximale et des précipitations (horizon 2050) pour une région correspondant aux bassins à l'étude.</i>	63

Figure 4.2	<i>Évolution des deltas des 16 scénarios pour la précipitation.</i>	64
Figure 4.3	<i>Évolution des deltas des 16 scénarios pour la température maximale.</i>	65
Figure 4.4	<i>Évolution des deltas des 16 scénarios pour la température minimale.</i>	66
Figure 4.5	<i>Hydrogrammes moyens des scénarios climatiques pour Churchill Falls.</i>	67
Figure 4.6	<i>Hydrogrammes moyens des écarts entre les apports simulés et reconstitués.</i>	70
Figure 4.7	<i>Évolution des volumes d'eau de l'horizon 1980 à 2080</i>	71
Figure 4.8	<i>Évapotranspiration potentielle reconstituée et simulée pour l'horizon 2050 pour le bassin Churchill (cm/d).</i>	73
Figure 5.1	<i>Résidus des températures maximales, journées pluvieuses et sèches confondues.</i>	84
Figure 5.2	<i>Transformation Box-Cox des résidus des températures minimales lors de journées sèches.</i>	88
Figure 6.1	<i>Comparaison des deltas mensuels et journaliers pour le scénario HadCM3A2a.</i>	96
Figure 6.2	<i>Comparaison des hydrogrammes : apports reconstitués, apports générés avec WeaGETS original et apports réels (m³/s).</i>	98
Figure 6.3	<i>Présentation des hydrogrammes du bassin de Churchill Falls générés avec WeaGETS original et HSAMI sur une période de 31 ans.</i>	99
Figure 6.4	<i>Présentation des hydrogrammes réels pour le bassin de Churchill Falls sur la période de 1972-2002 (31 ans).</i>	100
Figure 6.5	<i>Présentation des hydrogrammes reconstitués avec HSAMI pour le bassin de Churchill Falls sur la période de 1972-2002 (31 ans).</i>	101

Figure 6.6	<i>Présentation des écarts-types des précipitations observées et simulées avec WeaGETS selon une période de 30 années et de 300 années.</i>	102
Figure 6.7	<i>Présentation des écarts-types des températures maximales observées et simulées avec WeaGETS selon une période de 30 années et de 300 années.</i>	103
Figure 6.8	<i>Présentation des écarts-types des températures minimales observées et simulées avec WeaGETS selon une période de 30 années et de 300 années.</i>	103
Figure 6.9	<i>Comparaison des hydrogrammes moyens pour les apports reconstitués, simulés (précipitation simulée et températures observées) et réels (m^3/s).</i>	104
Figure 6.10	<i>Comparaison des hydrogrammes moyens pour les apports reconstitués, simulés (précipitation observée et températures simulées) et réels</i>	105
Figure 6.11	<i>Comparaison des hydrogrammes : apports reconstitués, apports générés avec WeaGETS/Box-Cox et apports réels (m^3/s).</i>	107
Figure 6.12	<i>Comparaison des hydrogrammes horizon 2050 : apports reconstitués, apports générés avec WeaGETS/Box-Cox/HadCM3a et apports reconstitués/HadCM3a (m^3/s)</i>	108
Figure 6.13	<i>Comparaison des hydrogrammes moyens pour les apports reconstitués, simulés horizon 2050 avec WeaGETS/Box-Cox (précipitation simulée et températures observées) et reconstitués horizon 2050.</i>	109
Figure 6.14	<i>Comparaison des hydrogrammes moyens pour les apports reconstitués, simulés horizon 2050 avec WeaGETS/Box-Cox (précipitations observées et températures simulées) et reconstitués horizon 2050.</i>	110
Figure 6.15	<i>Comparaison des hydrogrammes moyens pour les apports simulés horizon 2050 avec WeaGETS/Box-Cox, simulés horizon 2050 avec WeaGETS original, et reconstitués horizon 2050.</i>	111

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

CCIS	Canadian Climate Impacts and Scenarios
CICS	Canadian Institute for Climate Studies
CRU	Climatic Research Unit
DDC	Data Distribution Centre
ENSO	El Nino Southern Oscillation
ÉTS	École de technologie supérieure
GIEC	Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat
MCG	Modèle climatique global
MCR	Modèle climatique régional
OMM	Organisation météorologique mondiale
SRES	Special Report on Emissions Scenarios

INTRODUCTION

Depuis plus de trente ans déjà, les problématiques environnementales sont au cœur d'une multitude de discussions diplomatiques et de questionnements sur la politique dans le marché mondial. Les événements précurseurs des changements climatiques sont de plus en plus évidents, conscientisant les citoyens sur la fragilité des ressources naturelles. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le nombre de phénomènes extrêmes a doublé au cours des dix dernières années (Pachauri, 2002). On remarque, entre autres, quelques bouleversements météorologiques qui ont marqué l'histoire durant les dernières années, notamment la forte croissance d'ouragans de catégorie 5 en 2005 et les canicules prolongées en Europe lors de l'été 2003.

Les changements globaux du climat, causés par les effets de l'accroissement des gaz à effet de serre, ont des répercussions sur le cycle hydrologique. On anticipe des variations sur la fréquence et la quantité des précipitations, de même que sur l'évaporation produite par le réchauffement de l'air. En fait, une augmentation des précipitations est envisagée, mais non distribuée équitablement à travers la planète. Les cycles saisonniers seront parallèlement modifiés par ces perturbations. De plus, la qualité des eaux est susceptible d'être dégradée puisqu'elle est liée directement au caractère quantitatif des précipitations. La baisse des niveaux d'eau pourrait accroître l'apparition de bactéries et de métaux, tandis que les inondations augmenteraient les chances de pollution par les déchets urbains et agricoles dans les systèmes de distribution d'eau (Arnell, 1999a; Leconte et *al.* 2003; Warren, 2004).

Selon le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, 2001), on remarque, depuis la seconde moitié du XX^e siècle, une diminution de la couverture neigeuse et un raccourcissement de la période de gel des cours d'eau, concordant avec l'augmentation de la température à la surface du sol dans l'hémisphère Nord. Au pays, la température moyenne journalière est à la hausse de 1°C par rapport à la température

connue au début du XX^e siècle. Des études démontrent également une augmentation probable de 5 à 10°C pour la température moyenne annuelle du Canada durant les 100 prochaines années (Bourque, 2002).

L'emploi de l'eau dans le quotidien s'avère indispensable, puisque ses utilités sont à la fois diversifiées et nombreuses. C'est dans cette optique de consommation qu'Hydro-Québec Distribution intègre dans son processus de gestion les possibilités de fluctuations majeures du climat. Depuis 2000, il intègre les effets éventuels des changements climatiques sur la demande électrique au Québec. Les évaluations disponibles montrent qu'un réchauffement futur aurait comme répercussion une réduction de la demande énergétique pour le chauffage en hiver et une augmentation de la consommation durant la période estivale pour la climatisation (Ouranos, 2004).

Comme les deux tiers de l'énergie électrique au Canada sont créés par l'hydroélectricité, il est important d'anticiper toutes les avenues possibles à des changements drastiques dans le climat. La combinaison des réchauffements hivernaux et estivaux, l'évaporation créée par ces variations, de même que l'augmentation des précipitations pourraient modifier considérablement les quantités d'apports d'eau dans les centrales. On prévoit d'abord une augmentation en hydroélectricité dans le Nord du Canada et une diminution dans le sud. Il est également important de signaler qu'une augmentation dans le débit annuel n'est pas nécessairement de bon augure pour la production d'électricité. En effet, une amplification des tempêtes, des inondations, et de ce fait, des transports de sédiments, peut compromettre considérablement la production d'énergie (Warren, 2004; ASC, 2002).

La production d'électricité au Québec provient à plus de 80 % d'installations hydroélectriques dont les bassins versants sont situés au nord du 49^e parallèle. Pour gérer ses réservoirs de manière optimale et sécuritaire, la compagnie hydroélectrique Hydro-Québec se base sur la prévision des apports en eau aux réservoirs, de même que

la prévision des volumes et de la fonte de la neige au printemps. Cette dernière est employée afin de vidanger les réservoirs à une hauteur permettant d'absorber les crues associées à cette saison.

En 2000, Hydro-Québec Distribution confiait à des chercheurs le mandat d'établir des prévisions pour l'horizon 2020. Par la suite, en 2004, cette demande s'est répétée pour l'horizon 2030 en plus de trouver un scénario probable de l'évolution du climat au Québec (choix du scénario selon les règles du GIEC). Durant cette même année, d'autres études se sont entamées, dont celle-ci, pour élaborer les prévisions tendanciennes en 2050 de trois bassins spécifiques et stratégiques pour Hydro-Québec, soit Churchill Falls, Manic-5 et Caniapiscau.

Ce projet a été développé en trois étapes distinctes par leur mandat et la période d'exécution. La première, sur une période de quatre mois, a été effectuée principalement dans le but de fournir à Hydro-Québec Distribution des résultats plausibles pour la prévision à long terme des apports d'eau dans les trois bassins étudiés. Ces travaux consistaient à incorporer les données de la majorité des modèles climatiques globaux reconnus aux variables climatiques des réservoirs, pour ensuite les utiliser dans le modèle hydrologique HSAMI d'Hydro-Québec. Cette procédure permettait d'évaluer une tendance réaliste et objective de l'évolution des variables climatiques et hydrologiques.

L'objectif de la seconde partie de cette recherche était principalement destiné à reproduire les données climatiques futures des bassins hydrologiques à l'étude afin de les intégrer dans le modèle hydrologique HSAMI. L'utilisation du générateur stochastique conçu à l'ÉTS (École de technologie supérieure), le WeaGETS, a servi d'outil à la production de ces séries climatiques. Suite à la simulation des variables de température de ces bassins, on constate que dans 4,0 % des cas, la température maximale simulée est inférieure à la température minimale simulée lors de la même journée. Pour

remédier à cette problématique, le générateur stochastique a été modifié par l'intégration mathématique de la transformation Box-Cox dans le processus de simulation des températures.

Enfin, l'objectif de la troisième partie de cette étude était de comparer les apports moyens simulés lors de la première et de la deuxième étape du projet. Pour se faire, diverses expérimentations de modélisation ont été réalisées afin d'analyser les effets des variables climatiques sur les hydrogrammes moyens générés et d'expliquer les causes d'anomalies présentes entre les résultats des deux approches utilisées (méthode des deltas et générateur stochastique).

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Répercussions des changements climatiques sur le régime hydrologique

Les changements anticipés dans le climat sont une des principales sources d'inquiétude pour les sociétés d'aujourd'hui. En effet, ils pourraient causer des impacts significatifs sur le cycle et le régime hydrologique des cours d'eau, affectant ainsi les systèmes écologiques, sociaux et économiques. Par exemple, les variations des débits d'eau à l'entrée d'un réservoir hydroélectrique influenceront la gestion des risques associés aux infrastructures hydrauliques et à la production d'énergie. De plus, ces changements provoqueront des événements extrêmes de précipitation et d'inondation, augmentant les coûts des dommages matériels pour les victimes. Subséquemment, les changements climatiques contribueront à l'accroissement en termes de fréquence et/ou d'amplitude des tempêtes, des périodes de sécheresse, des vagues, de la pression atmosphérique, du volume d'écoulement, du niveau de la mer et des débits dans les cours d'eau (Goldstein et *al.* 2003).

1.2 Les modèles climatiques globaux

Pour bénéficier de tous les outils nécessaires à l'adaptation de l'espèce humaine aux changements climatiques, il suffit d'évaluer dans quelle proportion ceux-ci vont affecter la planète. En possédant des historiques météorologiques (nature de l'atmosphère et de ses changements pendant des périodes de temps courtes (Singh, 2003)) et climatique (ensemble des conditions atmosphériques au cours d'une période de temps assez longue et à travers un espace assez grand (Singh, 2003)) adéquat, il est maintenant possible de prédire les variations tendanciennes atmosphériques à venir.

Les modèles climatiques globaux (MCG) sont considérés comme des outils crédibles qui permettent de simuler les réponses du système climatique de la Terre à un changement en augmentant les concentrations de gaz à effet de serre. Ils sont en fait de puissants logiciels qui incorporent les phénomènes physiques pour simuler le fonctionnement du système de circulation générale. Les grilles sont tridimensionnelles dotées d'espacements horizontaux et de couches à la verticale.

Il existe environ une dizaine de modèles globaux produits et reconnus à travers le monde. Ils sont évidemment conçus pour intégrer un certain forçage correspondant à une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre. Cependant, depuis l'éruption volcanique du Pinatubo en 1991, les chercheurs ont introduit les aérosols naturels et anthropiques dans les MCG (Environnement Canada, 1997).

Depuis 1994, les modèles climatiques globaux sont utilisés pour évaluer les changements dans le climat. Ils génèrent des réponses consistantes aux forçages naturels et anthropiques (McGuffie et Henderson-Sellers, 2001). Toutefois, ces modèles comportent des limites dans les résultats et les simulations. En effet, les MCG établissent des approximations sur les phénomènes qui contrôlent le système climatique. Leur faible résolution, causée par la capacité restreinte des ordinateurs et les limites de connaissances disponibles, crée d'importantes incertitudes aux résultats (Boer, 2004).

1.3 Les scénarios climatiques

Afin d'évaluer les développements subits par les différents pays et de les intégrer dans les modèles climatiques globaux, le GIEC a créé, en 1992, une série de scénarios plausibles, appelée IS92. Ceux-ci se définissent comme étant une description possible du futur, d'après un ensemble de caractéristiques hypothétiques cohérentes et logiques. Dans un contexte socio-économique, un scénario correspond à la variabilité des émissions de gaz à effet de serre, influencée par les demandes énergétiques et

l'accroissement démographique. En ce qui a trait à la science de l'atmosphère, un scénario est employé pour évaluer les différents climats susceptibles de se produire.

Suite aux évolutions des activités humaines et aux décisions économiques et politiques des pays, le GIEC a engendré en 1996 un rapport (**Special Report on Emissions Scenarios**) définissant la modélisation de nouveaux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Ceux-ci permettent d'identifier les diverses hypothèses possibles de croissance démographique, économique, technologique et de l'exploitation des combustibles fossiles pouvant être rencontrées dans les prochaines décennies et siècles (Ouranos, 2004; Barrow et Lee, 2000). La présence de ces scénarios contribue à orienter les chercheurs vers la même ligne de pensée, sans ambiguïté sur les conclusions tirées des modèles. La source de scénarios est commune à tous et permet de comparer et de valider les résultats de différents MCG.

Le GIEC envisage dans une période ultérieure la réalisation de nouveaux scénarios climatiques où le climat de la fin du siècle correspondra aux répercussions de concentrations en CO₂ d'au moins deux fois celle de l'époque préindustrielle (Ouranos, 2004).

1.4 La méthode de « downscaling »

Comme il a été mentionné précédemment, les modèles climatiques globaux sont des outils de simulation consistants et donnent une bonne appréciation des tendances générales du climat futur. Toutefois, ils sont beaucoup moins performants lorsqu'il s'agit de raffiner les résultats vers une région précise. Ces modèles ne comprennent pas de maillages assez petits pour représenter adéquatement, par exemple, un bassin versant. L'échelle spatiale n'est point du même ordre de grandeur. Afin de permettre cette modélisation régionale, les chercheurs ont mis au point diverses procédures pouvant

résoudre ces problèmes et représenter au mieux de leur capacité des climats distincts localement.

La technique de réduction d'échelle dans l'espace (downscaling) contribue à l'obtention de données climatiques à résolution plus fine à partir de résultats de modèles globaux. Pour ce faire, on émet l'hypothèse qu'il existe des relations fortes entre les climats régionaux et de plus grandes échelles, et que ces relations resteront valides sous un climat futur. L'utilisation de cet outil peut améliorer l'information fournie par le scénario et même intégrer une partie des contrôles climatiques régionaux, mais son efficacité dépendra énormément de la région d'étude et de la disponibilité des données climatiques (Barrow et Lee, 2000). Le Tableau 1.1 présente les différentes échelles spatiales et temporelles utilisées, de même que les types de simulation connexes. La Figure 1.1 établit de manière imagée la relation et la différence de résolution entre un MCG et une méthode de « downscaling ».

Afin de contribuer à une résolution d'échelle adéquate, certaines variables seront disposées à être employées. Par exemple, la pression au niveau moyen de la mer peut être la valeur à réduire sous une échelle plus petite puisque sa variabilité spatiale est faible. Ce n'est certes pas le cas des précipitations, qui présentent une fluctuation importante d'une localité à l'autre.

Les techniques de « downscaling » peuvent être divisées en sous-ensemble, telles que les méthodes empiriques/statistiques, statistiques/dynamiques, de même que les nouveaux modèles climatiques régionaux (Hessami et *al.* 2004).

Tableau 1.1

Échelles spatiales et temporelles usuelles

Échelle	Selon l'espace (km ²)	Exemple (espace)	Selon le temps	Exemples (temps)
Macro-	> 10 000	Circulation générale de l'atmosphère	10 à 10 000 ans et plus	Changement climatique
Méso-	10 à 10 000	Climat d'une région : sud du Québec	Heures à années	Événement de précipitation, température
Micro-	< 10	Champ agricole, climat d'une région	Secondes à heures	Transfert de rayonnement solaire, transfert turbulent

(Singh, 2003)

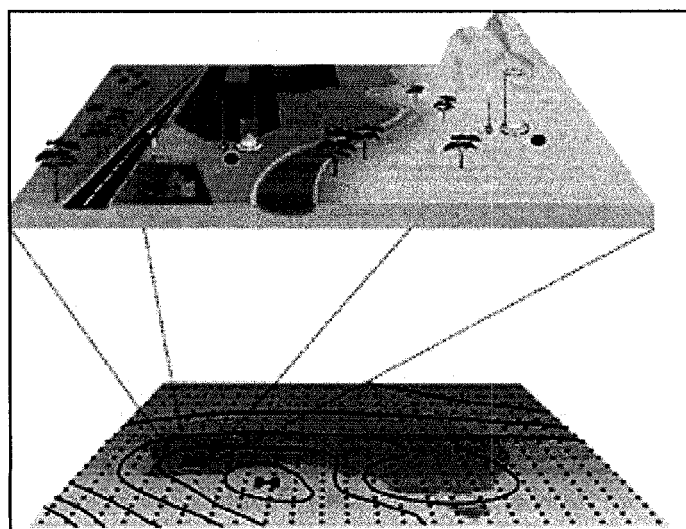


Figure 1.1 *Comparaison entre un MCG et le downscaling.*
(Commonwealth of Australia, 2006)

1.4.1 Les méthodes empiriques/statistiques

Comme le nom l'indique, ces méthodes sont basées sur des techniques statistiques qui permettent de relier les paramètres d'un modèle global à d'autres variables observées à une échelle locale (Leconte et *al.* 2003). À titre d'exemple, on retrouve dans cette catégorie le générateur de climat. En fait, celui-ci n'est pas une méthode de downscaling statistique comme telle. Ce dernier est un modèle stochastique numérique qui génère des séries climatiques journalières statistiquement identiques aux séries observées. Il est utilisé pour générer des scénarios de changements climatiques par l'intégration d'une perturbation dans les paramètres climatiques. Il doit être jumelé à une approche statistique/empirique pour permettre le « downscaling » des paramètres du générateur et en faire un outil de réduction d'échelle. Les séries de données générées doivent être de longue durée afin d'évaluer les effets à long terme.

1.4.2 Les méthodes statistiques/dynamiques

Les méthodes statistiques/dynamiques sont semblables à celles basées sur les techniques empiriques/statistiques. Toutefois, elles reposent sur l'utilisation de régimes de circulation atmosphérique comme paramètres. Des modèles statistiques sont étalonnés et vérifiés entre les conditions climatiques et les données de stations météorologiques. Ces techniques peuvent donner des scénarios plus réalistes de changement climatique. De plus, elles peuvent être utilisées avec une capacité informatique inférieure aux calculs numériques et peuvent générer avec facilité des ensembles de scénarios à résolution élevée. Toutefois, les connaissances reposant sur ces techniques sont ardues et obligent fréquemment l'aide de spécialistes. Aussi, afin d'évaluer le plus fidèlement possible les variations atmosphériques, une très longue série de données doit être employée. Enfin, il est parfois impossible d'établir de relations significatives entre les variables.

À titre d'exemple, le Statistical DownScaling Model (SDSM) (Wilby et Dawson, 2004) se définit comme un outil de simulation basé sur la méthode statistique/dynamique. En fait, il est un hybride entre la technique de régression et le générateur stochastique. Fuentes et Heimann (1996) résume clairement les caractéristiques globales de cette approche.

1.4.3 Les modèles climatiques régionaux

Les modèles climatiques régionaux (MCR) sont basés sur le même principe que les modèles de circulation générale, c'est-à-dire l'utilisation de maillages, mais à résolution plus fine pour évaluer les scénarios de changements climatiques. En fait, ils sont basés sur une méthode qui permet d'imbriquer un modèle à haute résolution couvrant un domaine restreint (une région) dans un modèle à basse résolution dont la grille couvre la totalité de la planète (MCG) (Caya, 2004). Cette technique permet de façon plus rigoureuse de simuler les variations régionales et locales du climat. De plus, elle tient compte des caractéristiques topographiques complexes et des hétérogénéités de la couverture des terres. Par contre, l'utilisation du modèle global reste nécessaire puisqu'il fournit les données initiales et les conditions météorologiques latérales dépendantes du temps.

1.5 Les modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques sont d'importants outils qui peuvent être utilisés conjointement avec un modèle climatique. Ils permettent de simuler les apports d'eau pour un bassin versant, selon les variables météorologiques entrées dans le modèle. Il est possible ainsi de visualiser les prévisions futures en approvisionnement en eau pour une région donnée. Plusieurs types de modèles hydrologiques existent présentement. Ils se composent de processus physiques et de formules mathématiques distincts. Selon

Fortin (2004), les modèles hydrologiques peuvent être divisés en méthodes empiriques, conceptuelles ou numériques à base physique.

1.5.1 Les modèles empiriques

Les modèles empiriques utilisent des variables descriptives dans une fonction de transfert pour simuler des débits. Ils identifient une relation entre les précipitations et les apports d'eau, sans se préoccuper explicitement des mécanismes physiques de transformation de précipitations en débit (Coulibaly et *al.* 2001). Ils fonctionnent comme « des boîtes noires », donc sans aucune considération de la structure interne du système. L'hydrogramme unitaire correspond à ce genre de technique (Pilgrim et Cordery, 1993). Ils peuvent être subdivisés en modèles statistiques ou en modèles non paramétriques.

1.5.2 Les modèles conceptuels

Les principales caractéristiques des modèles conceptuels reposent sur une représentation simplifiée des composantes du processus pluie-débit. Ils utilisent des réservoirs linéaires conceptuels associés à l'humidité du sol. Cette technique emploie également l'équation de continuité pour établir le bilan hydrique. Les modèles conceptuels peuvent être répartis en modèles globaux ou distribués. Les modèles globaux considèrent le bassin comme une entité unique. Des relations empiriques relient les entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique. Les modèles distribués, quant à eux, prennent en compte la variabilité spatiale et/ou les variables d'entrées et/ou les conditions aux limites et/ou les caractéristiques du bassin versant.

1.5.3 Les modèles numériques à base physique

Les modèles numériques à base physique ou déterministes discrétisent le bassin versant selon une échelle fine et résolvent à chacune des cellules une équation de continuité, de moment et d'énergie (conservation de la masse et de la chaleur) pour représenter le déplacement de l'eau dans le bassin versant (Coulibaly et *al.* 2001). Les paramètres entrants peuvent être théoriquement mesurés sur le terrain. Le fractionnement du bassin versant s'effectue généralement selon les caractéristiques physiographiques du terrain, comme la topographie, l'utilisation du sol ou la répartition de la population sur le territoire. Dû à la complexité des calculs, une technique numérique est employée pour résoudre la série d'équations différentielles partielles.

1.6 Les études réalisées

Depuis de nombreuses années déjà, des recherches abondent sur la modélisation des changements climatiques et ses impacts associés au régime hydrologique. En premier lieu, des chercheurs pluridisciplinaires ont permis la création des modèles climatiques globaux (Manabe et Hahn 1977, Hansen et *al.* 1983, Mitchell et *al.* 1995). Puis, leurs données résultantes ont ensuite été modifiées par l'intégration de techniques de « downscaling » (Richardson 1981, Richardson et Wright 1984, Nicks et Gander 1994, Semenov et Barrow 1997, Dickinson et *al.* 1989, Giorgi et Bates 1989, Laprise et *al.* 1998). Ces scénarios climatiques globaux ou régionaux ont été employés ultérieurement comme intrants à des modèles numériques basés sur les simulations hydrologiques d'un bassin versant (Coulibaly et *al.* 2001, Pilgrim et Cordery 1993, Schwarz 1977, Morin et Slivizky 1981, Abbott et *al.* 1986).

Pour connaître les tendances moyennes des changements dans le régime hydrologique d'un cours d'eau, certains chercheurs ont employé directement les résultats des modèles climatiques globaux dans un modèle hydrologique. C'est le cas de Morrison et *al.*

(2002) qui ont analysé la possibilité d'une variation future dans les tendances détectées dans les débits observés pour un bassin versant. Merritt et *al.* (2005), Matondo et Msibi. (2004) et Guo et *al.* (2002) ont également centré leur recherche vers une meilleure compréhension globale des variations hydrologiques pouvant affecter la disponibilité de la ressource en eau dans les réservoirs des bassins versants à l'étude, surtout en période d'été. Selon les résultats générés, les auteurs remarquent que les tendances sont encore significatives sous un aspect prévisionnel, affirmant qu'actuellement, elles sont déjà le fruit de changement dans le climat. Kerkhoven et Gan (2006) démontrent qu'il est possible de reproduire les variations mensuelles, la moyenne annuelle et le débit annuel minimum d'un large bassin sans utiliser une méthode de « downscaling ». En effet, les résultats générés avec l'aide de modèles climatiques globaux et de modèles pilotés par réanalyses tel que ERA 40, permettent de reproduire avec efficacité la fonte de la neige, les périodes d'été automnal et hivernal et le débit minimum annuel. Toutefois, les prévisions de débits produits par l'influence d'orages convectifs s'avèrent moins cohérentes. Néanmoins, les débits maximaux simulés indiquent adéquatement la variation quantitative de la crue printanière.

Pour combler les incertitudes causées par les modèles climatiques globaux, Morrison et *al.* (2002) et Merritt et *al.* (2005) ont employé une inversion statistique du climat (Giorgi et Mearns 1991, Lettenmaier et *al.* 1999, Loukas et *al.* 2002) où les valeurs historiques climatiques sont ajustées par l'ajout (ou la multiplication) de la variation prédite par le modèle global. Cette méthode appelée aussi « delta method » change la moyenne de la température mais non la variance. Cependant, pour les précipitations, autant la moyenne que la variance sont modifiées puisqu'elles ne sont pas distribuées selon une normale. Un algorithme est employé pour redistribuer la discontinuité des deltas à travers le mois entier, pour ainsi lisser les transitions entre chaque mois et préserver le delta moyen mensuel prédit par le modèle climatique. En utilisant trente années de données historiques, les auteurs considèrent qu'ils peuvent ainsi intégrer l'étendue moyenne des variabilités interannuelles telles que ENSO (El Nino Southern Oscillation). De plus,

pour le calcul des deltas, une moyenne pondérée de plusieurs points de grille près de la région visée minimise les erreurs de modélisation.

Des méthodes de « downscaling » peuvent être employées comme outils dans le processus de modélisation hydrologique. Coulibaly et Dibike (2004) ont analysé la possibilité de prédire les débits d'une rivière par l'intégration de variables climatiques dans trois techniques de réduction d'échelle. En effet, selon les auteurs, les modèles climatiques globaux ne sont pas conçus pour étudier les impacts de changement local et ne permettent pas l'obtention d'une bonne estimation du régime hydrologique. De plus, certains modèles hydrologiques doivent utiliser des variables climatiques de même facteur d'échelle de temps et d'espace que les résultats hydriques générés. Pour permettre leur conversion, on utilise des méthodes de « downscaling » tel que la régression (SDSM), le générateur de climat (LARS-WG) et le réseau neuronal artificiel. Dibike et Coulibaly (2004), Leander et *al.* (2005), Bürger et Chen (2005) et Jones et *al.* (2005) ont exécuté la même procédure en utilisant d'autres techniques de « downscaling ». Les résultats permettent de conclure que ces réducteurs d'échelle sont capables de donner une bonne estimation des volumes et des débits, même en ce qui a trait aux extrêmes.

Plusieurs auteurs ont utilisé la combinaison d'un modèle régional de climat avec un modèle hydrologique (Yu et *al.* 1999; Ibbitt et *al.* 2000; Anderson et *al.* 2003; Jasper et *al.* 2002; Koussis et *al.* 2003). Kay et *al.* (2006), Yoshikane et *al.* (2005), Lofgren (2004) et Collischonn et *al.* (2005) ont employé un modèle climatique régional qui, selon eux, permet mieux la représentation des précipitations sous une échelle temporelle et spatiale requise pour la modélisation des débits d'un bassin versant. En effet, puisque la précipitation est encore l'une des variables les plus difficiles à prédire, les récents résultats des modèles régionaux suggèrent des progrès dans ce domaine (Collier et Krzysztofowicz, 2000; Damrath et *al.* 2000; Golding, 2000; Mao et *al.* 2000; McBride et Ebert, 2000; Mullen et Buizza, 2001). La plupart des recherches ont été focalisées sur la

reproduction d'un événement précis (Yu et *al.* 1999; Ibbitt et *al.* 2000; Anderson et *al.* 2003; Jasper et *al.* 2002; Koussis et *al.* 2003, Kay et *al.* 2006, Yoshikane et *al.* 2005). Kunstmann et Stadler (2005) ont décidé de pousser plus loin en réalisant l'étude sur une année entière.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DES BASSINS VERSANTS À L'ÉTUDE

L'économie de la province du Québec est établie en partie sur la production d'hydroélectricité. En chiffres, elle occupe près de 4 % de la production intérieure brute et, au cours de la dernière décennie, de 5 à 12 % des investissements totaux. Les nombreux barrages érigés sur le territoire fournissent une puissance électrique de plus de 40 000 mégawatts (MW). En janvier 2000, il y avait au Québec 145 petites, moyennes et grandes centrales hydroélectriques répertoriées sur environ 50 rivières (MDDEP, 2002a).

On retrouve deux types de centrales sur les cours d'eau du Québec. Le premier se nomme la centrale au fil de l'eau qui correspond à une centrale alimentée directement par un cours d'eau et qui ne dispose pratiquement d'aucune réserve. Ces ouvrages sont construits principalement dans le sud du Québec. Puis, on retrouve la centrale avec réservoir qui est définie comme une centrale alimentée par l'eau accumulée dans un lac artificiel créé au moyen d'un barrage. Ce type d'ouvrage est surtout érigé dans le nord de la province et est considéré comme essentiel puisqu'il permet d'emmagasiner de l'eau pour la production annuelle ou pluriannuelle d'électricité. De ce fait, les réservoirs saisonniers emmagasinent l'eau au printemps et en été, et la relâchent en hiver alors que les apports sont insuffisants pour satisfaire la demande.

Le terme « bassin versant » est défini comme un territoire sur lequel toutes les eaux de surface s'écoulent vers un même point appelé exutoire (Banton et Bangoy, 1997). Il est délimité physiquement par la ligne suivant la crête des montagnes, des collines et des hauteurs de la région (ligne de partage des eaux). Plus l'exutoire d'un bassin versant est situé en aval sur une rivière, plus la taille du territoire du bassin est grande. De plus, un bassin versant peut contenir plusieurs sous-bassins, qui sont imbriqués les uns aux

autres. Le bassin versant remplit plusieurs fonctions hydrologiques, dont le stockage de l'eau de pluie et de la neige. Il accumule une quantité de cette eau selon une durée variable et la restitue sous forme de ruissellement (Gangbazo, 2004). Lorsqu'il s'agit de la gestion de l'eau, Environnement Québec définit un bassin versant comme un volume d'espace, comprenant les eaux de surface, les eaux souterraines, la végétation, les sols, la faune et la population humaine.

2.1 Bassin de la rivière Churchill

Le bassin de la rivière Churchill est situé au Labrador, dans la province de Terre-Neuve (Figure 2.1). Plusieurs stations météorologiques permettent d'obtenir des informations sur la température et les précipitations. D'après les rapports de données établis sur le site d'Environnement Canada (2005), on constate qu'entre 1971 et 2000, les températures maximales et minimales journalières moyennes sont de 18,7°C en été et de -28°C en janvier. La précipitation totale mensuelle maximale se chiffre à 112,3 mm et se situe au mois de juillet. Par ailleurs, en observant les données de 2001 à 2005, les températures maximales et minimales journalières moyennes sont évaluées à 20,0°C en juillet et à -28,9°C en janvier, et la quantité maximale de précipitation mensuelle à 142,0 mm.

Pour permettre une compréhension efficace du cycle de l'eau sur ce bassin versant, il est essentiel d'identifier les principales propriétés physiques qui prédominent sur le territoire. Ce dernier est d'ailleurs principalement couvert de tourbières, de marécages et de petits lacs interconnectés. De plus, la topographie du lit de la rivière est caractérisée d'abord par une dénivellée nulle, puis d'une forte pente amenant l'eau vers une gorge de 305 mètres plus bas sur une distance horizontale de 32 km.

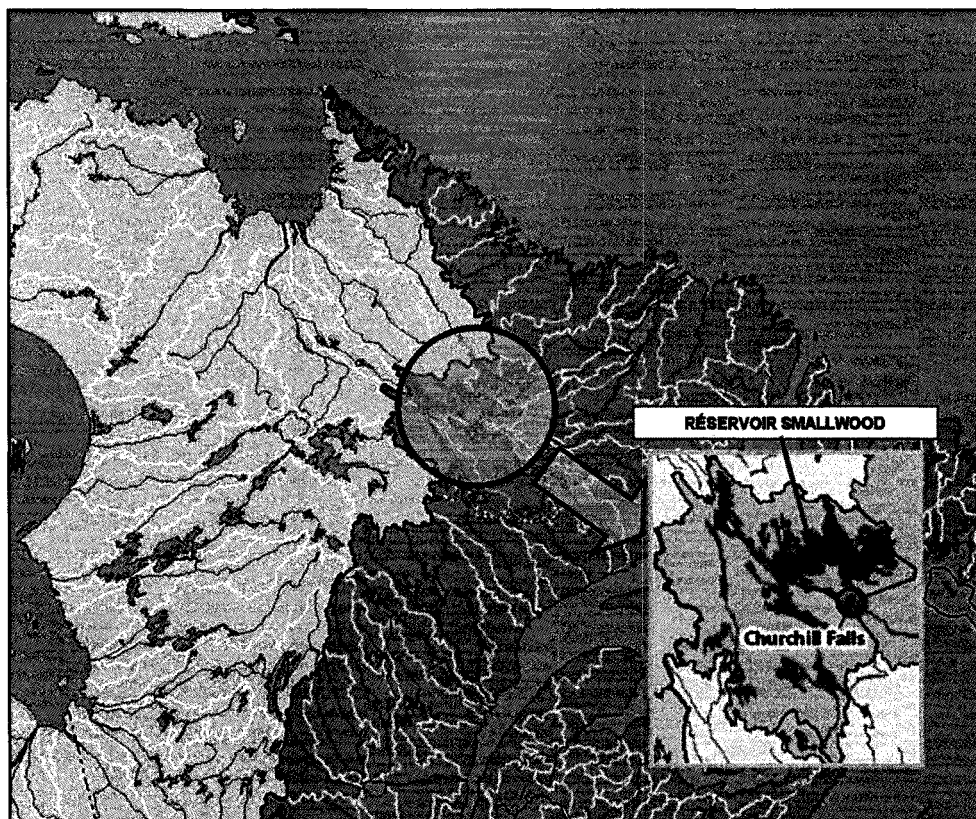


Figure 2.1 *Localisation du bassin-versant de la rivière Churchill.*
(Hydro-Québec, 2007)

Le bassin versant de la rivière Churchill inclut une partie importante de l'ouest et du centre du Labrador. Le réservoir Ossokmanuan se draine aussi dans ce territoire. On estime la longueur de la rivière à 856 km et la superficie du bassin versant à 69 200 km². Des études montrent que ce dernier reçoit environ 410 mm de pluie et 391 cm de neige annuellement, correspondant à 52 km³ d'eau. Cette quantité d'eau dépasse le volume nécessaire au fonctionnement de la centrale.

Le bassin versant de la rivière Churchill est une ressource importante d'électricité au Canada. Le barrage Churchill Falls a été érigé sur ce territoire. Il est d'ailleurs coordonné par Churchill Falls Corporation et Hydro-Québec depuis 1971. Lorsque toutes les digues (88 au total) sont fermées, un grand stockage d'eau peut être réalisé.

Le réservoir est connu sous le nom de Smallwood (Figure 2.2). Il couvre une superficie de 6 988 km² et permet d'emmagasiner 28 milliards de mètres cubes d'eau. Selon les renseignements d'Environnement Canada, le débit annuel moyen mesuré sur la rivière Churchill en aval du réservoir et près de la centrale hydroélectrique est évalué à 1335 m³/s pour la période 1972-2004. Le débit est maximal durant le mois de janvier avec un débit moyen de 1646 m³/s et minimal en mai avec une valeur de 1 108 m³/s. Enfin, la puissance installée de la centrale est de 5 429 MW.

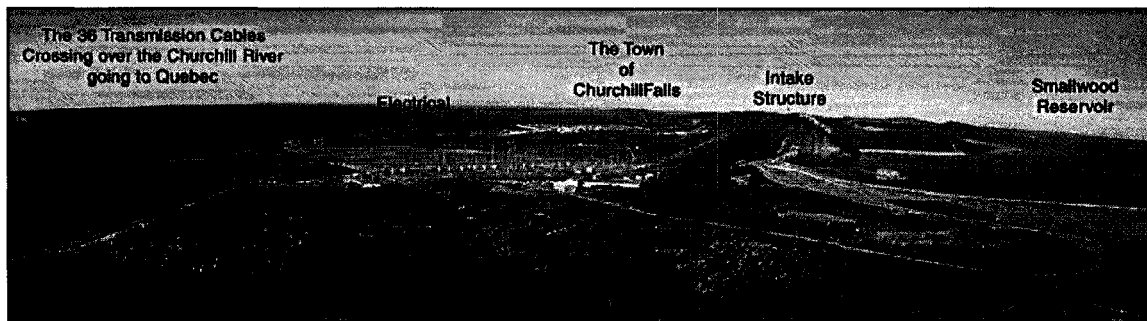


Figure 2.2 *Installation hydroélectrique et localisation du réservoir Smallwood.*
(Wikipedia, 2005)

2.2 Bassin de la rivière Manicouagan

La rivière Manicouagan se situe dans la région de la Côte-Nord, dans le Bouclier Canadien. Son embouchure est le Fleuve Saint-Laurent, à l'est de la municipalité de Baie-Comeau (Figure 2.3). La superficie totale du bassin versant est de 45 908 km². La longueur du cours d'eau est de 221 km à partir du réservoir Manicouagan. Il dispose en amont de quatre principaux affluents qui alimentent le réservoir. Ces derniers possèdent de fortes pentes. En aval, la rivière s'écoule selon une dénivelée plus faible. Le débit annuel moyen à l'exutoire du bassin est d'environ 1 002 m³/s. Selon le site d'Environnement Canada (2005), la précipitation moyenne totale (1971-2000) à Baie-Comeau est de 1014,4 mm et les températures maximales et minimales moyennes sont de 20,9°C en juillet et de 20°C sous zéro en janvier.

La rivière Manicouagan s'étend sur un territoire majoritairement boisé. Elle est vouée principalement à la production d'énergie hydroélectrique. Son régime hydrologique est modifié en raison de la présence de six barrages hydrauliques et d'un barrage-réservoir. Les quatre barrages « Manic » jouent en partie le rôle de bassin tampon lors de période de crues. (MDDEP, 2002c) La Figure 2.4 illustre ces barrages sur la rivière Manicouagan.

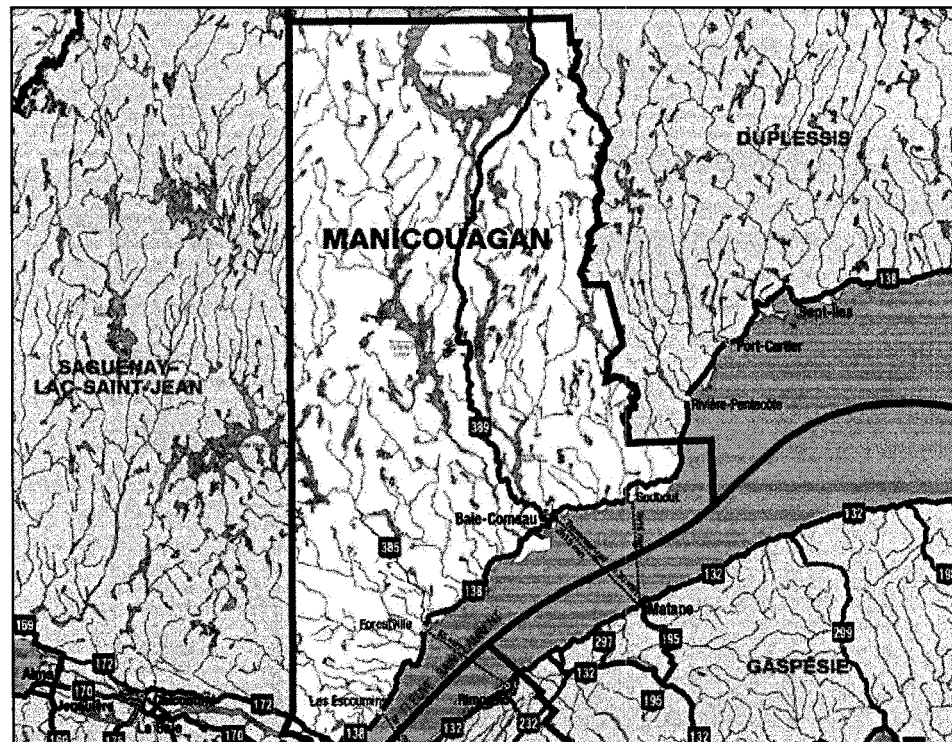


Figure 2.3 *Carte de localisation du bassin versant de la rivière Manicouagan. (MTQ, 2006)*

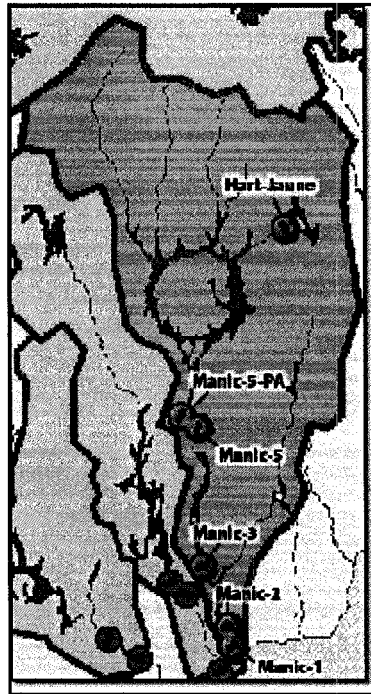


Figure 2.4 *Bassin versant de la rivière Manicouagan.*
(Hydro-Québec, 2006)

Le réservoir de Manicouagan alimente deux centrales avec réservoir. La première, nommée Manic-5, détient une puissance installée (somme des puissances nominales des alternateurs d'une centrale ou d'un parc de centrales) de 1 528 MW. Sa hauteur de chute est de 141,8 mètres et sa longueur est de 82 mètres. La deuxième centrale, appelée Manic-5-PA, fournit 1 064 MW. Sa hauteur de chute est de 144,5 mètres. Cette dernière est nommée ainsi pour « puissance additionnelle ». C'est en effet une centrale additionnelle qui a été construite en aval, plusieurs années après Manic-5.

Le réservoir s'étend sur une superficie de 1 973 km² et peut contenir jusqu'à 142 milliards de mètres cubes d'eau. Le barrage se nomme Daniel-Johnson, en l'honneur de l'ancien premier ministre québécois qui en fut l'instigateur. Il est considéré comme le plus gros barrage à « voûtes et contreforts multiples » du monde. Sa hauteur est de 214 mètres.

2.3 Bassin de Caniapiscou

Le réservoir Caniapiscou est le lac artificiel de tête du Complexe La Grande. Son bassin versant a une superficie de 36 900 km² (Figure 2.5). Le réservoir, quant à lui, s'étend sur un territoire de 4 318 km². Il permet d'alimenter le complexe La Grande avec un débit moyen annuel de 776 m³/s. Il assure également 35 % de la production énergétique. Le réservoir Caniapiscou peut contenir jusqu'à 39 milliards de mètres cubes d'eau. La rivière du même nom possède une longueur de 930 km. Elle s'écoule du lac Caniapiscou pour se jeter dans la rivière Koksoak. Son débit a été réduit de 40 % à son embouchure en raison des dérivations de Laforge (Caniapiscou-Laforge) vers la Grande Rivière (Figure 2.6). Au total, près de 46 ouvrages de retenue sont érigés sur le lac et les cours d'eau. Ils sont majoritairement des digues en terre d'une dizaine de mètres de hauteur. Deux barrages en béton sont également présents et jouent le rôle d'évacuateur et de régulateur.

La topographie de la région est caractérisée surtout par des immenses sablières exondées, des marécages, des tourbières et de très nombreux lacs. La forêt naturelle est constituée d'arbres clairsemés, d'arbustes et de mousses. En ce qui a trait au climat, il est caractérisé par de longs hivers rigoureux et des étés courts et frais. La température maximale et minimale journalière moyenne sont de 19,3°C et de -30,3 °C. Le gel des lacs et des cours d'eau couvre une période de 6 à 8 mois. Les précipitations locales annuelles sont de l'ordre de 600 à 900 mm dont 60 % est sous forme de neige.

CHAPITRE 3

MÉTHODES EMPLOYÉES LORS DE L'ÉTUDE

Ce chapitre présente les principales étapes nécessaires à l'obtention de résultats climatiques et hydrologiques. Dans un premier temps, il s'agit de choisir les modèles et scénarios climatiques globaux à employer comme intrant au modèle hydrologique. Ils permettront de construire les séries temporelles futures des variables climatiques du projet. Pour y parvenir, le calcul des écarts de valeurs entre la période représentant le présent et celle correspondant à la projection des diverses variables à l'étude est nécessaire. Enfin, ces résultats sont introduits dans le modèle hydrologique préalablement calibré et validé pour les trois bassins versants. L'ensemble de ce processus permettra l'obtention de séries d'apports selon l'échelle temporelle définie précédemment.

3.1 Application des modèles climatiques globaux

Les modèles globaux sont surtout employés pour évaluer les tendances moyennes du climat. Il est recommandé par le GIEC (2000) d'en utiliser le plus grand nombre possible lors d'une simulation à l'échelle régionale. Cette opération permet d'obtenir une plage de résultats pour une variable climatique précise. De plus, son importance est d'autant plus capitale puisque chaque modèle réagit différemment sous une zone restreinte. Les données de précipitation sont d'ailleurs nettement plus sensibles et variables lors d'une évaluation régionale.

3.1.1 Les scénarios climatiques

Comme il a été mentionné précédemment, plusieurs scénarios climatiques ont été créés afin d'aider à la prévision des changements prévus sous différentes hypothèses plausibles. Le GIEC (2000) recommande fortement l'utilisation de plusieurs scénarios

pour une évaluation des répercussions. Cette application permettra de contrer, dans une certaine mesure, les incertitudes induites par la gamme probable de climats éventuels.

3.1.1.1 IS92

Le IS92 est composé de six scénarios d'émissions (IS92a à IS92f). Le IS92e est considéré comme le scénario comportant des concentrations les plus élevées en gaz à effet de serre, tandis que le IS92c est présenté comme l'inverse. Le IS92a est celui qui a été le plus utilisé pour évaluer les impacts et les adaptations, puisqu'il est interprété comme le « scénario moyen ».

3.1.1.2 SRES

Comme il a été mentionné précédemment, de nouveaux scénarios ont été établis par le GIEC en 1996. Ceux-ci sont disposés en quatre familles :

La première famille est nommée A1. Elle signifie un ensemble de scénarios où l'économie mondiale s'accroît rapidement. Il n'y a plus de distinction entre les riches et les pauvres. La technologie et l'optimisation de la production se diffusent à travers la planète. L'espérance de vie humaine augmente, mais les familles se composent de moins de membres. En chiffre, la population s'élèverait à 9 milliards en 2050, pour descendre par la suite à 7 milliards en 2100. Il existe trois réalisations différentes qui partitionnent le scénario A1. Tout d'abord, on retrouve le scénario A1F1 qui se concentre sur l'utilisation de l'énergie fossile, donc non renouvelable, comme le charbon et les hydrocarbures. Ensuite, le A1T, qui privilégie surtout l'énergie renouvelable et l'énergie nucléaire. Puis, le A1B, se désignant comme une réalisation moyenne ou un compromis entre les deux autres réalisations.

Comme autre famille, le GIEC a introduit le A2. Elle est caractérisée surtout par une diminution dans la croissance des développements technologiques, puisque la diffusion des informations s'effectue très lentement. L'emphase est plutôt portée sur la communauté et la famille, créant ainsi un monde plus hétérogène. L'énergie nucléaire est considérée, mais le développement de systèmes à énergie renouvelable est limité. En chiffre, la population est évaluée à 15 milliards en 2100.

La famille B1 se compose de scénarios où la conscience environnementale est importante, de même que le développement social. Comme la famille A1, elle décrit un changement rapide dans la croissance économique et une mondialisation des marchés. Cependant, les priorités sont différentes. Ici, la famille B1 investit dans l'équité, l'institution et la protection de l'environnement. La population est évaluée à 9 milliards en 2050 et diminuera à 7 milliards en 2100.

Enfin, on retrouve la famille B2, qui est plutôt centrée sur une politique et une stratégie gouvernementales. Elle est influencée par l'environnement du citoyen, avec une tendance vers l'indépendance des communautés. L'égalité est ici une notion fortement importante, de même que la protection de l'environnement. Puisque ce système prédit surtout un monde hétérogène, la croissance technologique s'effectuera dans certaines régions seulement. La population est évaluée à 10 milliards en 2100 (Arnell et *al.* 2004; GIEC, 2001). La Figure 3.1 montre de manière imagée les quatre familles et les forces qui les influencent, tandis que la Figure 3.2 facilite la compréhension de l'évolution du climat selon plusieurs aspects généraux.

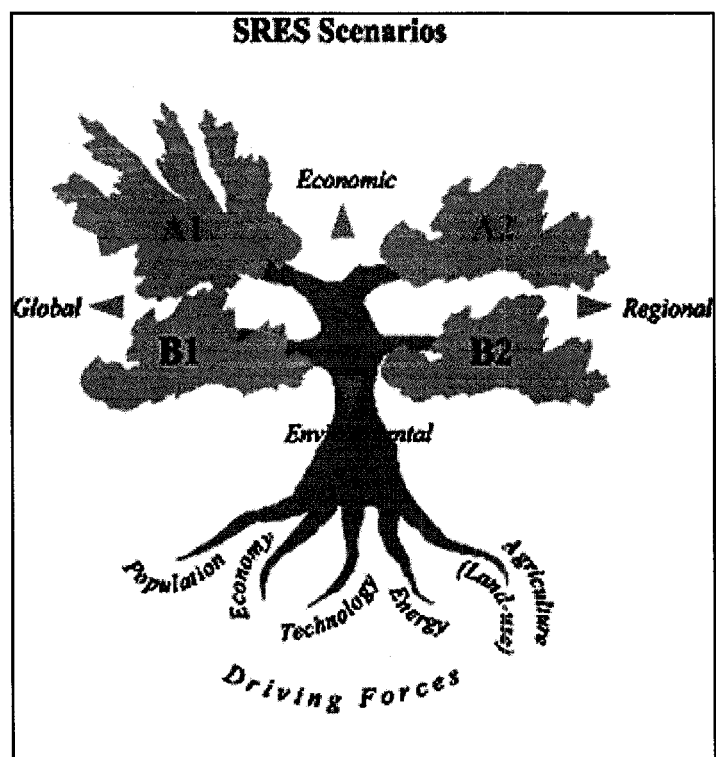


Figure 3.1 *Familles de scénarios du SRES.*
(GIEC, 2001)

Scenario	Population	Economy	Environment	Equity	Technology	Globalization	Climate
A1FI							
A1B							
A1T							
B1							
A2							
B2							

Figure 3.2 *Évolution de la société selon divers scénarios du SRES.*
(GIEC, 2001)

Selon la Figure 3.3, il est possible d'observer l'évolution de ces quatre familles temporellement, par la variation des concentrations en gaz à effet de serre durant la période de 1990 à 2100. On observe nettement la diminution des émissions pour les scénarios de type B et l'inverse pour la famille des A.

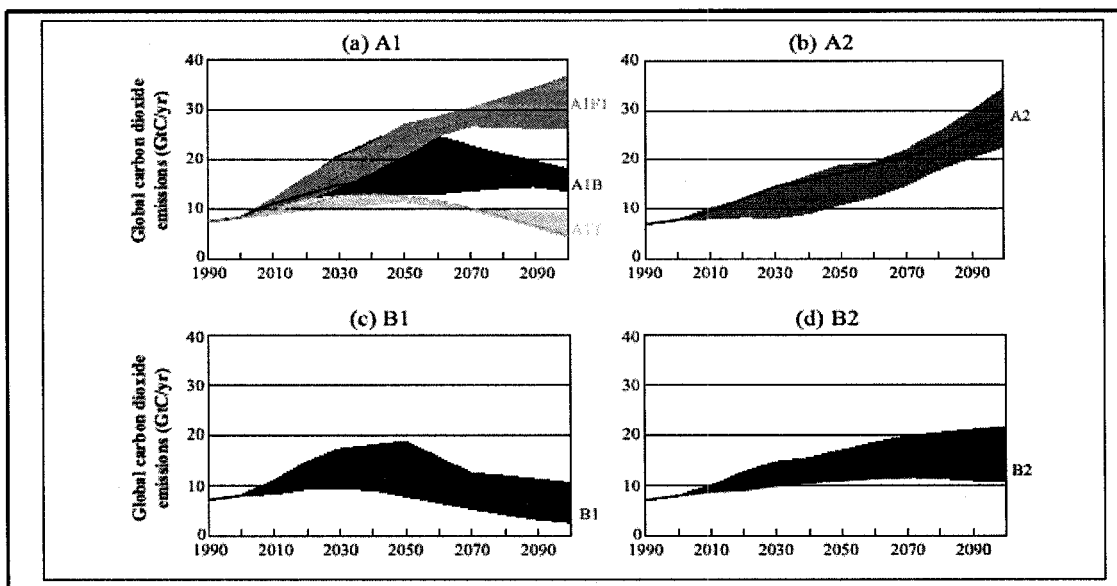


Figure 3.3 *Évolution temporelle des scénarios selon la quantité de CO₂.*
(GIEC, 2001)

En terme d'émissions de CO₂ dans l'atmosphère, la Figure 3.4 indique l'évolution des scénarios, de même qu'une comparaison entre eux et les familles de scénarios du IS92. On observe encore une fois l'augmentation flagrante de la pollution avec l'application des familles A1 et A2 des scénarios SRES.

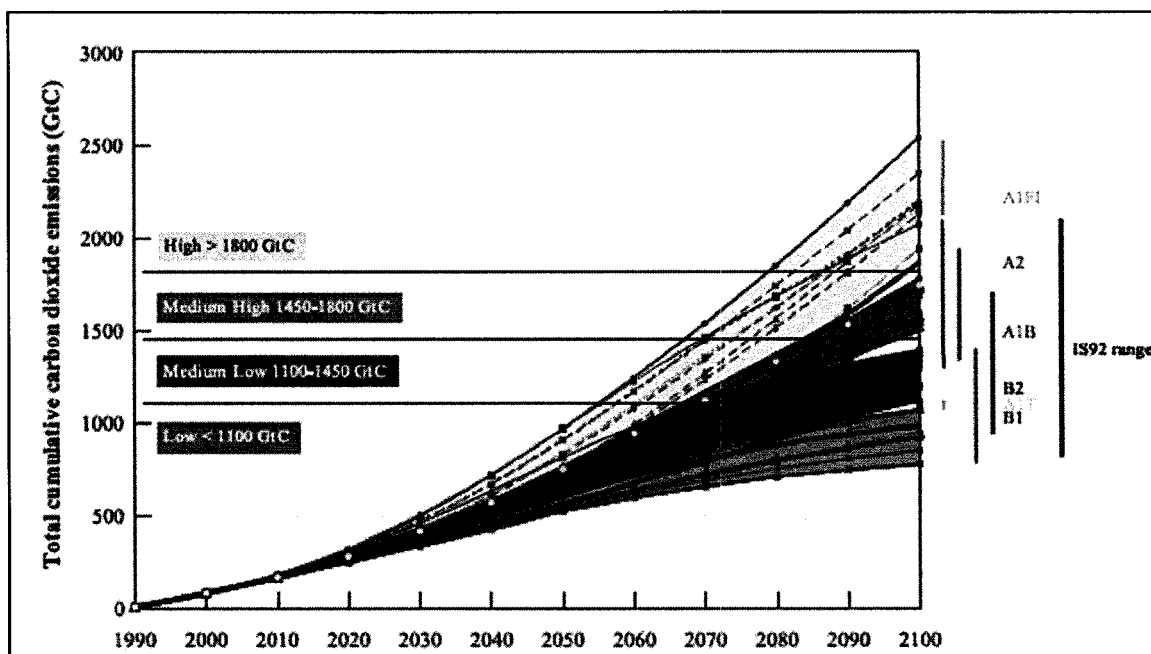


Figure 3.4 *Comparaison des scénarios IS92 et SRES.*
(GIEC, 2001)

Un phénomène, autre que les gaz à effet de serre, influence considérablement le climat. Il s'agit d'un effet parasol, provoqué par l'accumulation de particules dans l'atmosphère, qui tend à refroidir la température en surface. Ces particules, solides ou liquides, sont définies comme des aérosols et leur présence peut être causé par des événements naturels (volcans, rayonnement solaire) ou humains (fumée d'industries, combustibles fossiles). Les aérosols ont habituellement une durée de vie courte dans l'atmosphère et la plupart d'entre eux produisent un forçage radiatif négatif. Toutefois, ces éléments contribuent à la dégradation de la qualité de l'air et aux pluies acides. De plus, on constate que ces aérosols ont des répercussions sur la nébulosité et la réflectivité des cellules nuageuses par le biais de leur influence sur les propriétés et la longévité de ces nuages (GIEC, 2001). Les modèles climatiques prennent en compte la plupart de ces facteurs dans leur simulation de l'évolution du climat (Ouranos, 2004).

3.1.2 Sélection des modèles et scénarios dans le cadre de cette étude

Comme il est mentionné dans le GIEC, il est nécessaire d'utiliser le plus grand nombre possible de scénarios et de modèles globaux afin d'évaluer les différentes tendances plausibles de l'évolution du climat. Cet exercice permet d'interpréter une fourchette de valeurs types, d'après les modèles et scénarios les plus « extrêmes ». Toutefois, ces scénarios excluent les événements « surprises » ou « catastrophiques » (GIEC, 2000).

Les quatre familles de scénarios (SRES) ont été produites pour représenter différents développements démographiques, économiques, sociaux, technologiques et environnementaux. Ces évolutions hétéroclites peuvent, pour certains, correspondre à des changements positifs, et pour d'autres, représenter un bouleversement négatif sociétal. À l'intérieur de chacune de ces familles, il existe de nombreux scénarios représentant une interprétation quantitative des propriétés qui caractérisent la famille. Ainsi, ces scénarios sont développés par l'utilisation d'une gamme de modèles permettant d'analyser l'intervalle possible des résultats.

Le Tableau 3.1 présente les divers modèles et leurs familles de scénarios appropriées. La première valeur dans les cellules correspond au nombre de simulations dans la famille. Le deuxième nombre désigne la dernière année de simulation des scénarios. À titre d'exemple, le HadCM3 est composé de trois simulations dans la famille A2, qui sont nommées A2a, A2b et A2c. La lettre (a, b ou c) indique le « numéro de l'expérience lorsque le même modèle a été utilisé avec le même scénario, mais que l'on a répété l'expérience plus d'une fois en perturbant les conditions initiales du modèle » (Ouranos, 2004). Lorsque la dernière lettre est un « x », cela signifie que les résultats représentent la moyenne des simulations.

Tableau 3.1

Modèles et familles de scénarios

GCM	A1b	A1T	A1FI	B1	A2	B2
<u>CCSR/NIES</u>	1 2100	1 2100	1 2100	1 2100	1 2100	1 2100
<u>CGCM2</u>	1 2100	1 2100
<u>CSIRO-Mk2</u>	.	.	1 2100	1 2100	1 2100	1 2100
<u>ECHAM4</u>	1 2100	1 2100
<u>GFDL-R30</u>	1 2100	1 2100
<u>HadCM3</u>	.	.	1 2100	1 2100	3 2100	2 2100
<u>NCAR-PCM</u>	1 2100*	1 2100*

(GIEC, 2005)

Comme il a été mentionné précédemment, chaque scénario d'une même famille interprète différemment les quantités hypothétiques qui caractérisent ce groupe. En fait, cette distinction s'observe surtout par l'année, dans la série de données, où une perturbation de la concentration des gaz à effet de serre a été introduite. Cette perturbation consiste, bien sûr, à une augmentation des émissions atmosphériques, correspondant aux propriétés de la famille. Tel qu'expliqué au paragraphe précédent, les trois scénarios dans la famille A2 du HadCM3 ont été réalisés selon ce principe (Hanson et Goodess, 2004; Palutikof et Hanson, 2003). Les figures 3.5 et 3.6 présentent les différents « forçages » intégrés dans les scénarios. On remarque que les réalisations ayant la même lettre finale, telle que A2a et B2a, possèdent la même série de données de

1859 à 1989. Par la suite, une variation est introduite dans les scénarios. Il est toutefois essentiel de mentionner que tous les scénarios du même nom mais qui alimentent des modèles climatiques différents ne sont pas absolument identiques. L'hypothèse de départ ou la ligne de pensée peut être similaire, mais interprétée distinctivement en termes de chiffre. (Une tendance similaire est remarquée entre les modèles et scénarios).

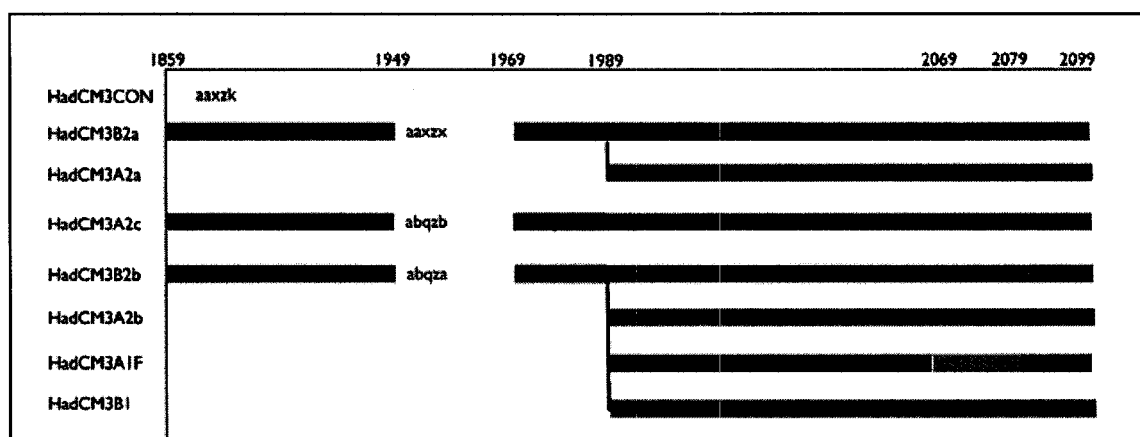


Figure 3.5 « Forçages » intégrés dans les scénarios du modèle HadCM3.
(GIEC, 2005)

Selon la Figure 3.6, la série de valeurs « aaxzk » désigne le scénario où aucun « forçage » d'émissions atmosphériques n'a été introduit. Seule la variation naturelle du climat est représentée. Les autres séries de données, telles que « aaxze » ou « aaxzl », correspondent aux réalisations anthropogéniques, c'est-à-dire qu'une augmentation de la concentration des gaz à effet est venue perturber l'évolution du climat.

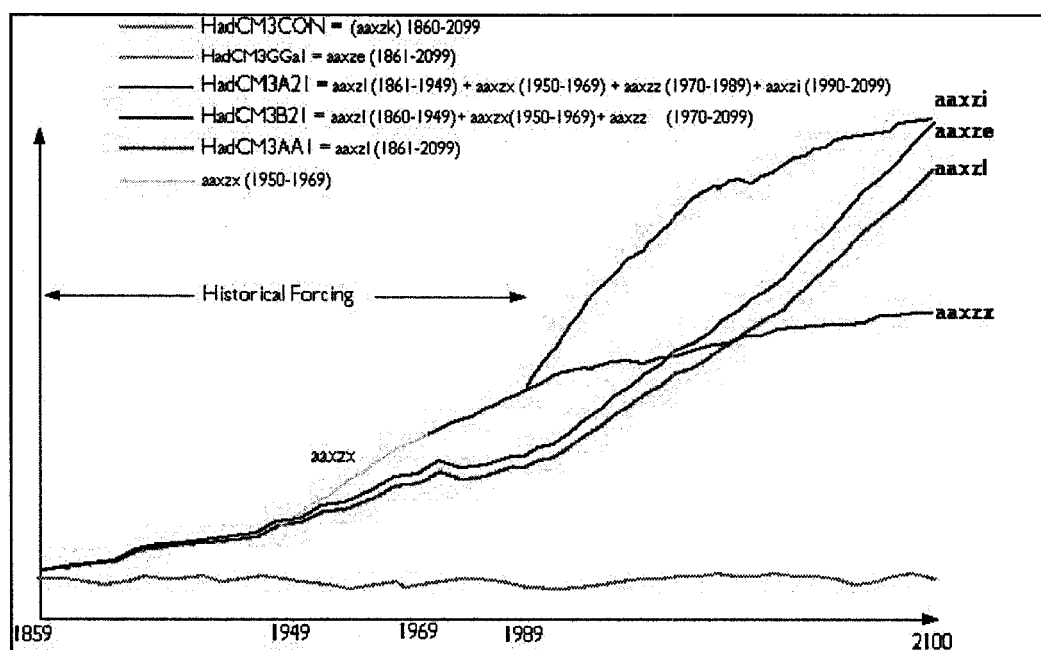


Figure 3.6 *Représentation graphique des « forçages » intégrés dans les scénarios du modèle HadCM3.*
(GIEC, 2005)

En ce qui a trait à cette présente étude, les paramètres des modèles de circulation générale, considérés essentiels au déroulement des applications, ont été obtenus du Centre de distribution des données du GIEC. Comme il a été mentionné dans les sections précédentes, tous les MCG disponibles doivent être utilisés afin d'établir un éventail plus large des anomalies suggérées. Les MCG accessibles sont le HadCM3 du Royaume-Uni, le CGCM2 du Canada, le CSIRO Mk2 de l'Australie, le CSRNIES du Japon et le ECHAM 4 de l'Allemagne. Toutefois, dépendamment du modèle, certains ne détiennent pas de résultats associés à tous les scénarios du SRES. De plus, les deux modèles américains, soient le GFDL R30 et le NCAR-PCM n'ont pu être employés dans les simulations. En effet, lors des expérimentations, plusieurs données importantes étaient manquantes, amplifiant ainsi la possibilité d'incertitudes dans les résultats. Pour restreindre les difficultés, ces modèles ont été écartés du projet.

3.1.2.1 HadCM3

Le HadCM3 est développé et décrit par Gordon et *al.* (1997) de même que Pope et *al.* (2000). Sept scénarios alimentent ce modèle. Ce dernier détient un maillage rectangulaire de 96 points de grille en longitude et de 73 points en latitude. Il est également divisé en 19 couches verticales. Il possède donc une incrémentation des points de grille de 3,75 degrés en longitude et de 2,5 degrés en latitude. Puisque les données climatiques du GIEC représentent le monde entier, la matrice de paramètres est orientée selon les points de grille provenant de l'ouest vers l'est et du nord vers le sud. L'annexe I présente la grille de ce modèle sur la province du Québec.

Les valeurs accessibles sont de 1960 à 2099. Les données du GIEC sont mensuelles mais, avec l'aide du CRU (Climatic Research Unit), il a été possible de trouver des résultats journaliers de la température minimale, maximale ainsi que des précipitations pour six des sept scénarios. Toutefois, puisqu'il n'existe qu'un seul modèle où l'on détient ces valeurs quotidiennes, les données du CRU ont été abandonnées pour cet exercice. Sur le site du GIEC, trois scénarios sont manquants, soient le B1a, le B2b et le A1F1. De ce fait, quatre 4 scénarios seulement ont été utilisés pour la génération des apports.

3.1.2.2 CGCM2

La description du modèle est disponible dans Flato et Boer (2000). Le CGCM2 a été modélisé avec deux scénarios, soient le A2 et le B2. Il est divisé en 96 points de grille en longitude et 48 points en latitude. Il comporte également 10 couches verticales. Son incrémentation est de 3,75 degrés en longitude et en latitude. L'orientation du maillage est de l'ouest vers l'est et du sud vers le nord. Les données accessibles sont mensuelles, de la période 1900 à 2100. Seuls les paramètres de précipitation et de température

maximale et minimale ont été utilisés. La carte représentant le maillage du modèle est présentée à l'annexe I.

3.1.2.3 CSIRO Mk2

Le modèle couplé CSIRO Mk2 est décrit en détail par Gordon et O'Farrell (1997). Le terme « couplé » désigne l'application combinée d'un modèle atmosphérique et d'un modèle océanique. Son schéma représentant l'océan est défini par Hirst et McDougall (1996).

Ce modèle a été alimenté par quatre scénarios, soient A1, A2, B1, B2. Il est divisé en 64 points de grille en longitude, 56 points en latitude et 9 couches à la verticale. L'incrémentation de son maillage est de 5,625 degrés en longitude et 3,214 degrés en latitude. Son orientation est de l'ouest vers l'est, et du sud vers le nord. Les données accessibles sur le site du GIEC sont de la période 1900 à 2100 et sont mensuelles. Les valeurs de précipitation, de température maximale et minimale ont été choisies pour ce projet. La carte représentant le maillage du modèle est exposée à l'annexe I.

3.1.2.4 CCSRNIES

Le modèle climatique couplé CCSRNIES est détaillé dans l'article d'Emori et *al.* (1999). Il détient 64 points de grille en longitude et 32 points en latitude, ce qui fait de lui le modèle possédant la résolution spatiale la plus faible. Son incrémentation est de 5,625 degrés en longitude et en latitude. De plus, son orientation est de l'ouest vers l'est et du nord vers le sud. Il est possible de consulter l'annexe I pour visualiser la grille de ce modèle climatique.

Le CCSRNIES a été modélisé avec quatre scénarios, soient A1, A2, B1, B2, dont les données sont accessibles de 1890 à 2100. Les valeurs du GIEC sont les précipitations, les températures maximales et minimales mensuelles.

3.1.2.5 ECHAM4 / OPYC3

Le modèle couplé global ECHAM4/OPYC3 est une réalisation conjointe de Max-Planck-Institut for Meteorology (MPI) et de Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ). La description de cette modélisation est définie dans Bacher et *al.* (1998). Son maillage est divisé en 128 points de grille en longitude et en 64 points en latitude. L'incrément de ce dernier est de 2,8125 degrés en longitude et en latitude. La matrice de données est construite de l'ouest vers l'est et du nord vers le sud. Il est possible de visualiser la carte à l'annexe I.

Le modèle a été modélisé avec deux scénarios, soient A2 et B2. Cependant, les données du GIEC ne détiennent pas la période correspondant au présent. En fait, la série de valeurs commence à partir de 1991. Cette situation était pour le moins embarrassante puisque la période manquante est essentielle aux calculs subséquents. L'élimination de ce modèle ne pouvait être une solution à cette impasse, car ECHAM4 est munie d'une échelle relativement petite pour un modèle global. Il a été toutefois possible d'obtenir ces données mensuelles sur le site du CCIS (Canadian Climate Impacts and Scenarios).

3.2 Application des anomalies de précipitation et de température

Le principal objectif de cette recherche consistait à anticiper de manière générale le climat dans le Nord du Québec, spécifiquement pour les bassins hydrologiques de Churchill Falls, Manic-5 et Caniapiscau. De plus, la projection du système climatique dans le futur devait permettre d'évaluer les apports sous un aspect horizon 2050. Cette notion sera expliquée dans cette section. Pour obtenir les résultats désirés, la première

étape consistait combiner les paramètres climatiques observés d'un bassin donné aux variables des différents scénarios des modèles climatiques. Pour ce faire, quelques algorithmes devaient être employés.

3.2.1 Les variables climatiques

Comme il a été mentionné précédemment, la projection future du climat doit être évaluée en établissant une relation entre les données climatiques existantes et les résultats calculés avec les scénarios climatiques. Avant d'entamer les calculs analytiques, certaines notions doivent être préalablement définies.

3.2.1.1 La théorie du « baseline »

Selon Barrow et Lee (2000), le climat actuel correspond à une période de trente ans dont les paramètres répondent aux variations climatiques actuelles, telles que définies par l'OMM (**O**rganisation **M**étéorologique **M**ondiale). Le climat de ces trente années se définit en termes de moyenne, de variabilité et de valeurs extrêmes. Il permet également de caractériser les tendances ou cycles actuels possibles. Les scientifiques ont établi cette période aux années 1961 à 1990. Toutefois, elle sera bientôt remplacée par la série climatique de 1971 à 2000.

3.2.1.2 Les horizons normalisés

Outre le climat actuel, les scénarios climatiques futurs sont produits également sur des périodes de trente ans. En fait, l'approche consiste à sectionner les données en trois « horizons » ou trois périodes de séries de trente années. Les horizons normalisés par le GIEC et le CCIS sont 2020, 2050 et 2080. L'horizon 2020 correspond à la série de données de l'an 2010 à 2039, tandis que l'horizon 2050 inclut les paramètres de l'an 2040 à 2069. Enfin, l'horizon 2080 englobe la période 2070 à 2099. Lors de cette

recherche, les analyses se sont majoritairement concentrées à l'horizon 2050. Les variables climatiques résultantes de ces intervalles de temps sont présentées sous forme mensuelle.

3.2.2 Les algorithmes

La première étape du processus consiste d'abord à calculer l'écart de la valeur des paramètres climatiques entre le climat présent et futur. Pour ce faire, il faut utiliser les données du « baseline » et de l'horizon choisi afin de les comparer. Cet exercice s'effectue pour chacun des scénarios à l'étude. Les équations peuvent s'écrire comme suit :

Équation pour le calcul des écarts de températures maximales et minimales sur une base mensuelle :

$$\Delta_{T,x,i} = horizon_{x,i} - baseline_i \quad (3.1)$$

Équation pour le calcul des écarts relatifs de la quantité de précipitation sur une base mensuelle :

$$\Delta_{P,x,i} = \frac{horizon_{x,i} - baseline_i}{baseline_i} \quad (3.2)$$

où l'indice x désigne le numéro de l'horizon ($x = 1, 2, 3$), dépendamment de l'ordre établi par l'utilisateur à l'emploi des horizons 2020, 2050 et 2080. L'indice i indique le rang d'une valeur dans la série de données mensuelles ($i = 1, 2, 3, \dots, 12$).

La méthode du ΔP et du ΔT consiste donc à calculer l'augmentation ou la diminution en précipitation et en température d'un horizon donné, en comparaison avec le climat

actuel. En appliquant ces deltas à des données climatiques observées, il est possible d'obtenir une indication de la variation du climat dans le futur. Comme il est possible de le constater dans les équations précédentes, le ΔP est calculé en ratio et le ΔT , en écart de température. Il est essentiel de mentionner que la moyenne des anomalies mensuelles des trente années d'un horizon choisi sera ajoutée aux données historiques.

Lors de cette recherche, un total de 16 scénarios climatiques a été utilisé. Pour chacun d'eux, les écarts de température et de précipitation ont été calculés pour l'horizon 2050. Par la suite, ces mesures ont été ajoutées aux valeurs observées des bassins hydrologiques. Les données climatiques du bassin de Churchill Falls et de Manic-5 sont disponibles de la période du 1^{er} janvier 1960 au 31 décembre 2002. La collecte des paramètres du bassin de Caniapiscau commence toutefois le 1^{er} octobre 1960. Voici les équations correspondantes à la production de séries climatiques futures :

Équation pour le calcul des températures maximales et minimales futures :

$$T_{i,x} = T_i + \Delta_{T,x,i} \quad (3.3)$$

Équation pour le calcul de la quantité de précipitation future :

$$P_{i,x} = P_i \cdot \Delta_{p,x,i} \quad (3.4)$$

3.2.3 Les problématiques et les limites

Lorsqu'il s'agit d'étudier les variabilités et les extrêmes, qui sont surtout rencontrés localement, les MCG ne sont pas disposés à donner des résultats satisfaisants. Cette situation s'explique par la grandeur de leur échelle horizontale. De plus, les extrêmes apparaissent aux limites de la variabilité simulée par les modèles, alors que ces derniers

sous-estiment souvent la variabilité observée (Diaz-Nieto et Wilby, 2005; Ouranos, 2004; Knutti et Stocker, 2002).

Les incertitudes concernant les émissions futures de gaz à effet de serre sont un aspect non négligeable à évaluer. Bien qu'il existe une gamme de réponses pour, par exemple, la température moyenne de la Terre, seul un sous-ensemble des six scénarios d'émissions IS92 et des quatre scénarios d'émissions SRES est utilisé. Chacun des scénarios suppose des forçages radiatifs et une composition de l'atmosphère différents, confirmant l'éventail des projections futures plausibles entre les limites indiquées par les deux scénarios les plus extrêmes. Ensuite, la sensibilité du climat, qui se définit comme le réchauffement planétaire moyen à l'équilibre pour une concentration atmosphérique doublée de CO₂, peut également varier d'un modèle à l'autre puisque chacun est conçu sous des processus physiques et des algorithmes de calculs distincts (GIEC, 2000).

En considérant les approches de calculs précédentes, ces dernières sont satisfaisantes pour élaborer une tendance générale de l'évolution du climat, mais ne permettent point une meilleure exactitude des résultats. Cette situation s'explique par l'intégration de deltas mensuels aux données climatiques. En effet, la génération des apports repose sur l'emploi de ces variations mensuelles de précipitation, de température minimale et maximale. Cependant, les variables climatiques historiques des bassins, à qui l'on doit ajouter ces deltas, ont été prises quotidiennement. Ainsi, à toutes les données journalières d'un mois, le même delta leur sont attribuées. Cette méthode influencera probablement les variations mensuelles et saisonnières possibles et provoquera certainement un effet de palier (transition abrupte entre deux mois successifs provoquée par l'ajout du même delta pour chaque jour d'un mois).

3.2.4 Application retenue

Une des solutions envisagées au départ à ce problème aurait été d'utiliser les valeurs journalières des simulations des modèles. Cependant, rares sont celles disponibles à ce jour. De plus, le degré de paramétrisation employé et la faible échelle spatiale tendent à créer une distorsion dans la variabilité journalière. Cette dernière se définit comme une tendance à générer trop d'événements pluvieux avec des intensités trop faibles par rapport aux données observées (Ines et Hansen, 2006). Néanmoins, les données de simulation quotidienne issues de modèles climatiques globaux semblent d'intérêt dans une perspective de mise à l'échelle statistique (Ouranos, 2004). Toutefois, pour limiter la variabilité des résultats, la deuxième partie de ce rapport portera entre autres sur l'utilisation d'un modèle mensuel, tel que le HadCM3A2a, comme intrant dans un générateur de climat.

3.3 La modélisation hydrologique : utilisation de HSAMI

La modélisation hydrologique est aujourd'hui nécessaire puisqu'elle permet d'aider les gouvernements à prendre des décisions éclairées sur certains domaines économiques tels que la production d'énergie hydroélectrique. Elle est désignée pour quantifier les impacts des changements climatiques sur l'écoulement dans un bassin versant. Cette modélisation reproduit de manière conceptuelle le cycle hydrologique incluant des mécanismes physiques comme le ruissellement ou l'évaporation. Une représentation schématique du cycle hydrologique est montrée à la Figure 3.7.

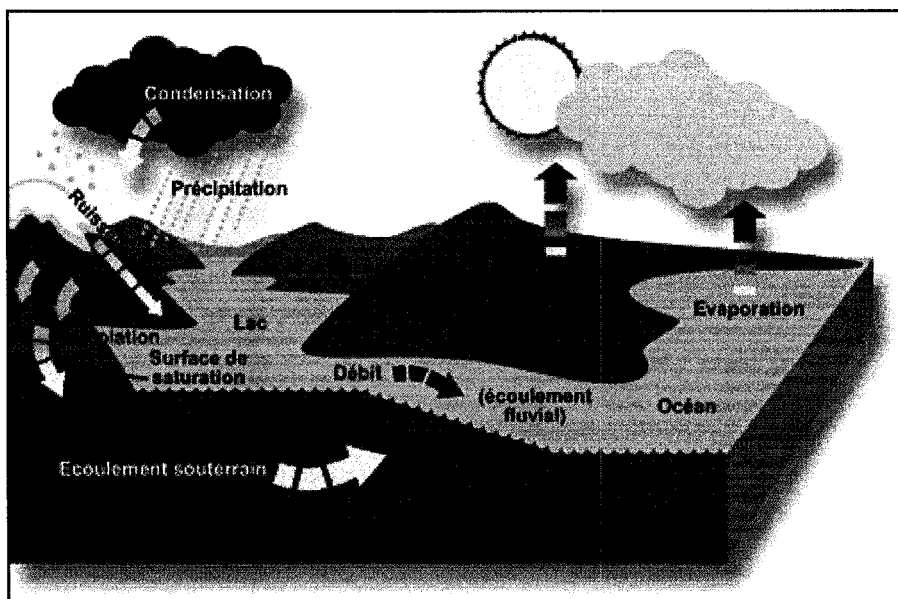


Figure 3.7 *Schématisation du cycle hydrologique.*
(Environnement Canada, 2004)

Sous un aspect de prédiction future de l'évolution des changements climatiques et des répercussions possibles sur le régime hydrologique, l'utilisation des résultats ou sorties des modèles climatiques globaux dans un modèle hydrologique devient un outil important. Ils permettent entre autres d'analyser les méthodes de planification des ressources en eau et les installations existantes. En effet, l'incertitude reliée aux impacts causés par les changements climatiques justifie la surveillance accrue de la vulnérabilité des infrastructures hydrologiques (Loaiciga et *al.*, 1996).

Dans un même ordre d'idées, les conséquences d'un accroissement des émissions atmosphériques induiront probablement un réchauffement de la température à la surface de la terre. Par ce fait, les probabilités de changements reliées aux variations saisonnières des précipitations et de l'écoulement des cours d'eau seront très élevées et pourraient produire une amplification de la sévérité des inondations et des périodes de sécheresse. C'est pourquoi, en la présence de ces phénomènes extrêmes, les

infrastructures hydrauliques, telles que les barrages et les digues, doivent être conçues de manière à les supporter.

Lors de cette recherche, le modèle hydrologique HSAMI a été utilisé pour simuler le cycle hydrologique des bassins de Churchill Falls, de Manic-5 et de Caniapiscau. Le choix de cet outil est principalement dû au fait que HSAMI est la propriété d'Hydro-Québec, le bénéficiaire du projet. En effet, les hydrologues de cette entreprise gouvernementale ont calibré et validé avec succès HSAMI sur de nombreux bassins versants et est employé sur une base opérationnelle.

3.3.1 Description du modèle

Le modèle HSAMI (Bisson, et Roberge, 1983) est utilisé depuis plus d'une vingtaine d'années par l'entreprise Hydro-Québec à des fins de prévisions hydrologiques. En effet, il permet de réaliser des projections futures des apports d'eau à un réservoir et d'évaluer le débit à l'exutoire d'un bassin versant.

L'approche de ce modèle consiste à intégrer les variables météorologiques observées du site à l'étude, telles que la pluie, la neige, de même que les températures maximales et minimales, afin de permettre la modélisation des débits journaliers à l'exutoire du bassin versant. Ce modèle est basé selon une méthode conceptuelle à temps discret. Il est composé de trois réservoirs linéaires en cascade générant des impulsions filtrées par deux hydrogrammes unitaires (Fortin, 2000).

La méthode de réservoirs en cascade consiste à discrétiser la zone vadose en couches horizontales pour ainsi évaluer le transport de l'eau dans le sol. Le processus reproduit le mouvement de l'eau s'infiltrant par gravité dans le sol, de même que l'écoulement horizontal de surface, intermédiaire et de base. L'accumulation de la neige au sol et de la pluie, la fonte du couvert de neige de même que le gel et le dégel du sol sont des

processus intégrés de manière empirique dans le modèle. Les interactions entre l'eau disponible en surface, la zone non-saturée et la zone saturée sont modélisées de manière à produire le cheminement vertical de l'eau à travers une colonne de sol. L'eau en transit via l'hydrogramme de surface et l'hydrogramme intermédiaire sert à modéliser le cheminement horizontal de l'eau vers l'exutoire lorsqu'elle quitte la colonne de sol ou lorsqu'elle ruisselle à la surface du sol (Fortin, 2004). La Figure 3.8 illustre le concept des réservoirs en cascade.

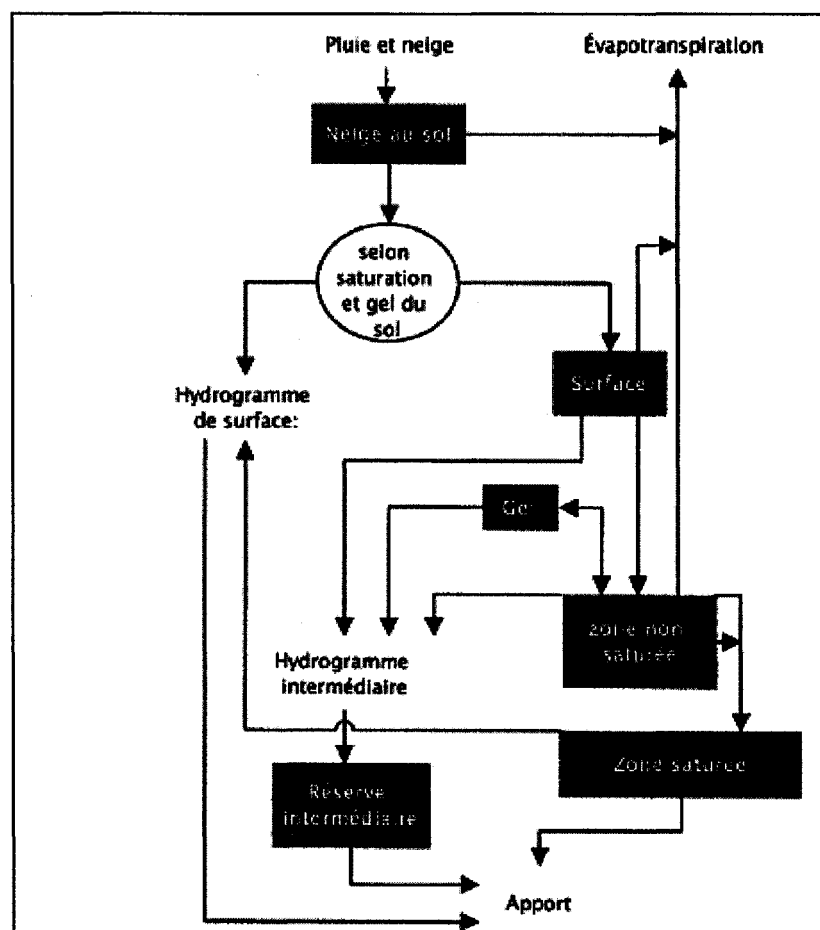


Figure 3.8 *Concept des réservoirs en cascade pour HSAMI.*
(Fortin, 2004)

Le modèle hydrologique HSAMI requiert des données climatiques pour son fonctionnement, des données présentant les propriétés physiques du bassin et des paramètres régissant les différentes composantes du cycle hydrologique modélisées. Ainsi, le cycle de l'eau peut être défini sur le territoire par l'intégration de différentes données :

- une matrice de six colonnes correspondant aux variables météo. Les données sont : la température minimale, la température maximale, la précipitation sous forme liquide, l'équivalent en eau des précipitations solides, l'indice d'ensoleillement (ici, l'indice a été imposé à 0,5 par le modèle lorsque cet intrant est omis) et l'équivalent en eau du couvert nival. Pour ce dernier paramètre, une valeur de -1 a été imposée afin de signifier au modèle l'utilisation du couvert de neige simulé;
- un vecteur de deux mesures de superficie : la superficie du bassin versant en km^2 et la superficie du réservoir principal, également en km^2 ;
- un vecteur de 23 paramètres caractérisant le système;
- un vecteur de 10 variables d'état représentant l'état des réservoirs et du stock de neige au début de la simulation (neige au sol, fonte, neige au sol total, fonte totale, dernière neige, gel, dégel, sol, nappe et réserve intermédiaire);
- deux vecteurs de variables d'état représentant l'eau cheminant vers l'exutoire; modulée par l'hydrogramme de surface (vecteur 1) et l'hydrogramme intermédiaire (vecteur 2), au début de la simulation (quantité d'eau associée à chaque classe d'un histogramme discret représentant l'hydrogramme unitaire).
- deux vecteurs de poids positifs, la somme des poids de chaque vecteur devant être unitaire, donnant la forme de ces deux hydrogrammes (histogramme discret représentant la forme de l'hydrogramme unitaire).

Suite à la modélisation du bassin hydrologique, le logiciel permet d'obtenir des variables d'état et d'écoulement pour chaque pas de temps, c'est-à-dire, dans le contexte de ce projet, sur une base journalière. Ces résultats sont :

- une matrice comprenant les valeurs simulées par le modèle des 10 variables d'état pour chaque pas de temps (neige au sol, fonte, neige au sol total, fonte totale, dernière neige, gel, dégel, sol, nappe et réserve intermédiaire);
- une matrice de cinq composantes de l'apport horizontal simulé, soient le débit de base, l'apport intermédiaire, le ruissellement de surface, la précipitation directe au réservoir et l'apport total (m^3/s). Ce dernier est le résultat recherché;
- une matrice de cinq composantes de l'apport vertical simulées, soient le débit de base, l'eau expédiée à l'hydrogramme intermédiaire, l'eau expédiée à l'hydrogramme de surface, le bilan de précipitation et de l'évaporation directe au réservoir et la somme de ces quatre derniers paramètres convertie en m^3/s .

3.3.2 Limites du modèle HSAMI

La modélisation d'un régime hydrologique selon une approche conceptuelle globale est très intéressante lorsque le besoin est d'anticiper une projection moyenne des apports globaux pour un bassin versant. L'échelle de temps dépend généralement de la taille du bassin à modéliser. Il est possible de remarquer que les bassins versants au Québec et au Canada présentent une taille de quelques centaines à quelques dizaines de milliers de km^2 . Sur ces territoires, peu d'observations hydrométéorologiques sont disponibles pour les bassins versants du Nord. Puis, les séries d'observations sont échelonnées sur de courtes périodes. On remarque aussi que le couvert nival a une grande influence sur le cycle hydrologique. C'est pourquoi cette variable d'état doit être le mieux possible reproduite dans les modèles hydrologiques.

Le modèle météo-apport HSAMI conduit en général à des prévisions de bonne qualité, mais il présente certaines faiblesses lorsqu'il s'agit de petits bassins ou de périodes très

courtes. De plus, il utilise comme intrant une moyenne des variables climatiques du bassin qui se doit d'être la plus représentative possible, ce qui est parfois difficile puisque les bassins versants québécois possèdent souvent une densité de réseau de stations très variable (Coulibaly *et al.*, 2002).

3.3.3 Calibrage et validation

Le calibrage du modèle hydrologique HSAMI a été réalisé par une équipe de deux scientifiques de l'entreprise Hydro-Québec (Dominique Tapsoba et Claude Gignac). Pour le bassin de Churchill Falls, la période de calibrage a été réalisée de 1972 à 1987 et la période de validation, de 1987 à 2002. Caniapiscau a plutôt été calibré de 1968 à 1987 et validé de 1987 à 2000. Enfin, la simulation de Manic-5 consiste en un calibrage de la période de 1968 à 1987 et d'une validation de 1987 à 2002.

La figure 3.9 compare les apports moyens observés et ceux simulés selon le type de calibrage choisi pour le bassin de Churchill Falls. Les apports observés correspondent à la période de calibration et de validation, soit de 1972 à 2002. On peut remarquer une légère sous-estimation de la crue printanière pour la courbe simulée ($4265 \text{ m}^3/\text{s}$). La crue semble davantage ponctuelle que celle observée où l'on observe plutôt deux pointes distinctes. En fait, ces dernières sont localisées le 30 mai et le 4 juin avec des débits moyens autour de $4500 \text{ m}^3/\text{s}$. Le Tableau 3.2 présente d'ailleurs quelques statistiques concernant le 30 mai.

De plus, on constate un débit supérieur durant la première partie de la saison automnale et par la suite un volume d'eau inférieur. L'hiver et le début du printemps semblent toutefois calibrés plus précisément. Enfin, l'hydrogramme simulé est lissé par rapport aux données observées, diminuant ainsi les variations journalières. Les graphiques de Manic 5 et de Caniapiscau sont présentés à l'annexe II. Ces derniers montrent en général

un bon calibrage pour le bassin Caniapiscaw et un écart plus considérable pour les débits moyens de pointe du bassin de Manic 5.

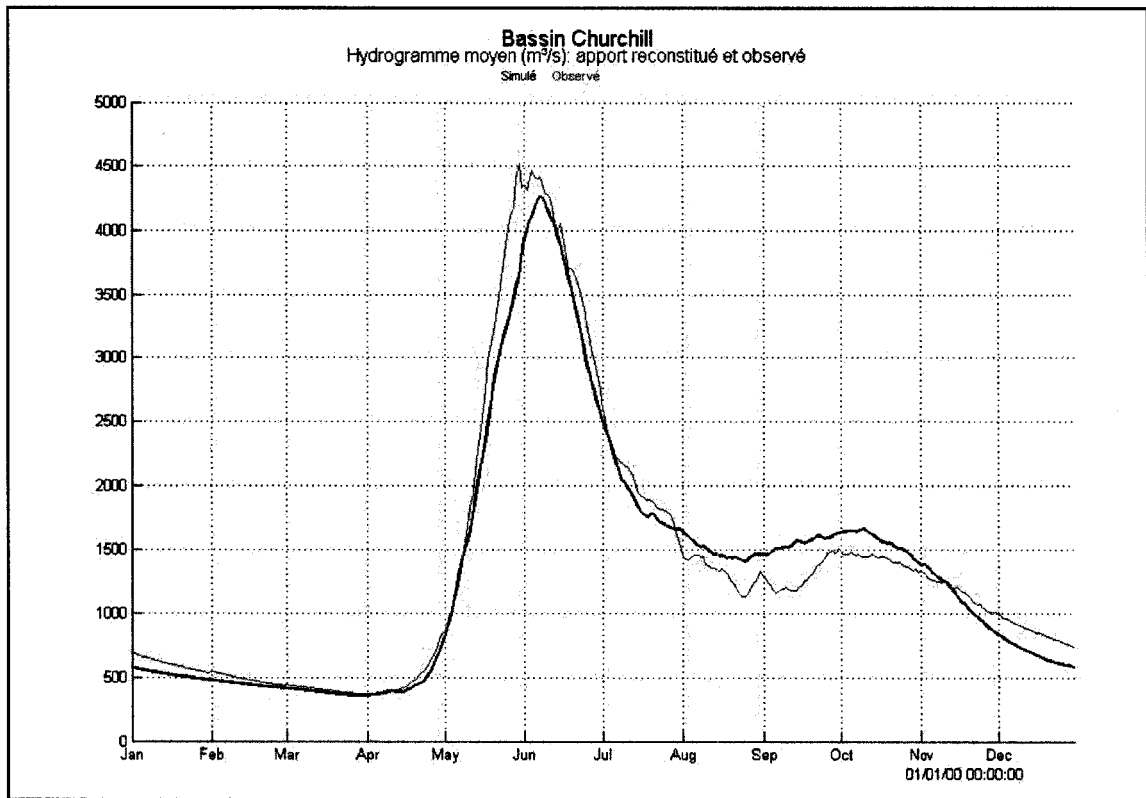


Figure 3.9 *Comparaison de l'hydrogramme observé et simulé selon le calibrage choisi pour le bassin de Churchill Falls.*

Bien que la courbe observée ne soit représentée exactement par le logiciel HSAMI, le coefficient de Nash-Sutcliffe (Nash Sutcliffe, 1970) entre les débits réels et simulés est de 0,856. Ce dernier est défini comme un coefficient d'ajustement d'hydrogrammes qui quantifie la qualité de la calibration. L'équation est comme suit :

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (3.5)$$

Tableau 3.2

Données statistiques des paramètres utilisés au calibrage et
à la validation du bassin de Churchill Falls (1972-2002)

	Valeur moyenne	Valeur maximale	Valeur minimale
<i>30 mai</i>			
Débits (m ³ /s)	4518	9147	1193
Précipitation (mm)	3	18	0
Temp. max. (°C)	11	25	2
Temp. min. (°C)	0	7	-3

Lorsque le coefficient de Nash-Sutcliffe est proche de 1, on peut affirmer que le calibrage est adéquat. Toutefois, s'il est égal ou inférieur à 0, le modèle fournit alors une prévision du débit qui est moins bonne que d'utiliser la moyenne des débits observés comme prévision. Dans ce présent contexte, le coefficient démontre une bonne reconstitution des débits.

3.3.4 Les stations climatiques employées

Théoriquement, il est maintenant plus facile de recueillir les données climatiques à travers la planète. En effet, des stations ont été installées dans des régions cibles. De plus, depuis 1970, les satellites aident à la récupération des variables climatiques (Mitchell et Jones, 2005; Lakshmi et Susskind, 1997).

La prise systématique d'observations météorologiques au Québec ne date que d'environ 125 ans. Cependant, des études en géomorphologie (fossiles), en écologie (pollen) et dendrochronologie (cernes des arbres) permettent d'obtenir des indications du régime

thermique et parfois, des conditions d'humidité qui ont prévalu au cours du dernier millénaire (Environnement Canada, 1997).

Lors de ce projet, plusieurs stations météorologiques ont été employées pour représenter les trois bassins à l'étude. Churchills Falls comporte 8 stations à l'intérieur ou près du territoire, tandis que 18 stations ont été valides pour produire les paramètres climatiques du bassin de Manic-5. Pour Caniapiscau, 15 stations ont été désignées à cette fin. Les tableaux 3.3 à 3.5 indiquent les informations pertinentes concernant les stations employées. La Figure 3.10 présente la localisation géographique de ces stations.

Tableau 3.3
Stations météorologiques utilisées pour le bassin de Churchill Falls

Churchills Falls				
Stations	Numéro (Env. Can.)	Latitude (décimal)	Longitude (décimal)	Source
Nitchequon	A7095480	53,20 °N	-70,90 °W	Environnement Canada
Border A	A7110830	55,20 °N	-60,13 °W	Environnement Canada
Schefferville A	A7117825	54,80 °N	-66,80 °W	Environnement Canada
Churchills Falls A	A8501132	53,55 °N	-64,10 °W	Environnement Canada
Twin Falls	A8504050	53,30 °N	-64,30 °W	Environnement Canada
Twin Falls A	A8504060	53,63 °N	-64,48 °W	Environnement Canada
Wabush Lake A	A8504175	52,56 °N	-66,52 °W	Environnement Canada
Churchill Falls	A850A131	53,57 °N	-64,10 °W	Environnement Canada

Tableau 3.4

Stations météorologiques utilisées pour le bassin de Manic-5

Manic-5				
Stations	Numéro	Latitude (décimal)	Longitude (décimal)	Source
Baie-Comeau A	A7040440	49,13 °N	-68,20 °W	Environnement Canada
Chute aux Outardes	A7041530	49,13 °N	-68,38 °W	SMC ⁽¹⁾
Gagnon A	A7042590	51,57 °N	-68,08 °W	SMC
Labrieville B1	A7043540	49,32 °N	-69,58 °W	SMC
Les Chainons	A7044291	49,35 °N	-70,37 °W	SMC
Manic Mille 76	A7044460	49,97 °N	-68,07 °W	SMC
Manicouagan A	A7044470	50,39 °N	-68,50 °W	SMC
Poste Montagnais	A7046212	51,53 °N	-65,44 °W	Environnement Québec
Sept-îles A	A7047910	50,13 °N	-66,16 °W	Environnement Canada
Caotibi	A704A0J9	50,72 °N	-67,52 °W	SMC
Toulmoustouc	A704HE0G	50,13 °N	-67,93 °W	SMC
Camp M-107	A704J01E	51,07 °N	-67,48 °W	SMC
Nitchequon	A7095480	53,20 °N	-70,90 °W	Environnement Canada
Wabush Lake A	A8504175	52,56 °N	-66,52 °W	Environnement Canada
Bonnard	A7060825	50,73 °N	-71,05 °W	Environnement Québec
Lac Benoît	A7061001	51,33 °N	-71,07 °W	Alcan
Manouane Est	A7061155	50,40 °N	-70,32 °W	Alcan
Chute-des-Passes	A7061541	49,90 °N	-71,25 °W	Alcan

(1) Service météorologique du Canada

Tableau 3.5

Stations météorologiques utilisées pour le bassin de Caniapiscou

Caniapiscou				
Stations	Numéro	Latitude (décimal)	Longitude (décimal)	Source
Chapais 2	A7091305	49,78 °N	-74,87 °W	Environnement Canada
Chibougamau A	A7091401	49,82 °N	-74,42 °W	Environnement Canada
Chibougamau	A7091400	49,92 °N	-74,37 °W	Environnement Canada
Chibougamau Chapais A	A7091404	49,77 °N	-74,53 °W	Environnement Canada
Eastmain	A7092305	52,25 °N	-78,52 °W	Environnement Canada
La Grande Rivière (A)	A7093715	53,63 °N	-77,70 °W	Environnement Canada
La Grande IV (A)	A7093GJ3	53,75 °N	-73,67 °W	Environnement Canada
La Grande LG3	A7093P1L	53,72 °N	-75,43 °W	Environnement Canada
Mistassini Post	A7095000	50,50 °N	-73,92 °W	Environnement Canada
Nitchequon	A7095480	53,20 °N	-70,90 °W	Environnement Canada
La Grande LG4	A709C71L	53,83 °N	-73,50 °W	Environnement Canada
Shefferville A	A7117825	54,80 °N	-66,80 °W	Environnement Canada
Wabush Lake A	A8504175	52,56 °N	-66,52 °W	Environnement Canada
Bonnard	A7060825	50,73 °N	-71,05 °W	Environnement Québec
Lac Benoît	A7061001	51,33 °N	-71,07 °W	Alcan

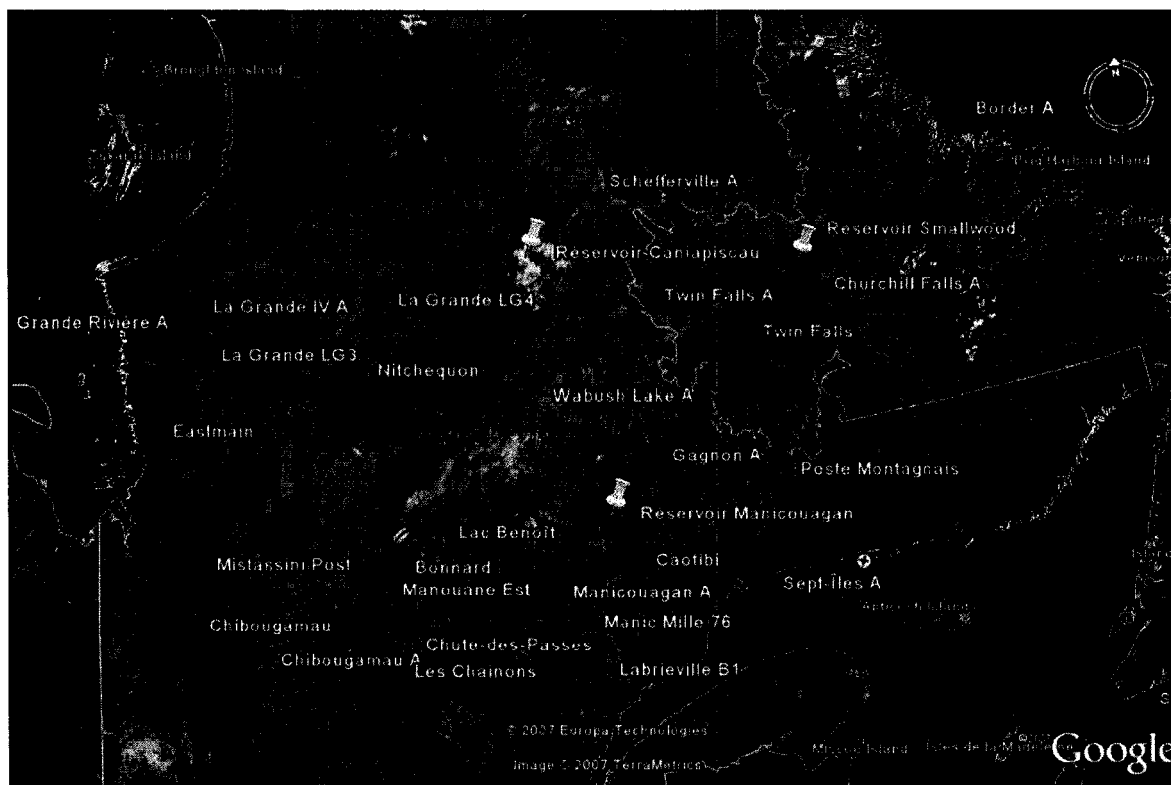


Figure 3.10 *Localisation des stations climatiques et des trois bassins à l'étude.*
(Adapté de Google Earth, 2007)

3.3.5 Interpolateur spatial : polygones de Thiessen

Pour intégrer les données provenant de plusieurs stations météorologiques dans le processus de modélisation hydrologique, il suffit d'employer un outil permettant de répartir les valeurs à la surface du bassin hydrologique. En effet, les quelques stations installées sur le territoire ne peuvent que fournir une approximation globale du climat. Ainsi, l'application d'un interpolateur spatial semble inévitable.

Le polygone de Thiessen a été utilisé comme interpolateur pour chaque bassin à l'étude. La méthode théorique consiste à porter les points de mesures sur une carte topographique. Ensuite, ces points sont reliés par des segments de droite. Puis, une

perpendiculaire est tracée au centre de chacune des droites. Les interactions de ces perpendiculaires déterminent les polygones. Chacun de ces derniers comporte la hauteur de précipitation choisie. Elle est celle relevée à la station située à l'intérieur du polygone. Ses côtés, de même que la ligne de partage des eaux, représentent les limites de l'aire et du poids accordées à chaque station (Tapsoba, 2004). La Figure 3.11 présente cette méthode.

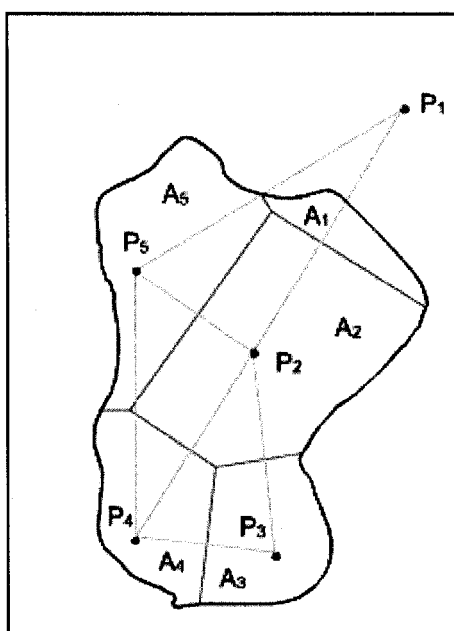


Figure 3.11 *Polygone de Thiessen.*
(Musy, 2005)

À l'intérieur de ce projet, une série unique des variables climatiques est interpolée pour représenter la météorologie de chaque bassin à l'étude (donc trois séries de données représentant les réservoirs Smalwood (Churchill Falls), Manicouagan et Caniapiscau). Celle-ci est calculée de manière à moyenner les valeurs journalières présentes sur le bassin, par l'entremise des stations météorologiques.

La première étape de ce processus est tout d'abord d'analyser les « patrons » de chaque journée à l'étude. Un patron est défini comme un vecteur révélant quelles stations ont émis des informations météorologiques lors de cette journée. Il est possible de retrouver plusieurs jours de la période avec la même configuration de disponibilité des stations.

L'application expérimentale de la méthode de Thiessen diffère quelque peu de la théorie définie précédemment, mais reste basée sur les mêmes principes. Premièrement, le bassin est divisé en une grille rectangulaire et les dimensions sont imposées par l'utilisateur du modèle. Pour chaque type de patron observé, chaque point de grille est associé à la station météorologique la plus proche. Par ce fait, il est possible de calculer les proportions de chaque station (leur polygone) sur la superficie à l'étude, telle que spécifiée dans la méthode de Thiessen. L'extrait de cette approche est un vecteur de quatre colonnes contenant les valeurs journalières interpolées (température maximale, température minimale, pluie, neige). La Figure 3.12 illustre la technique.

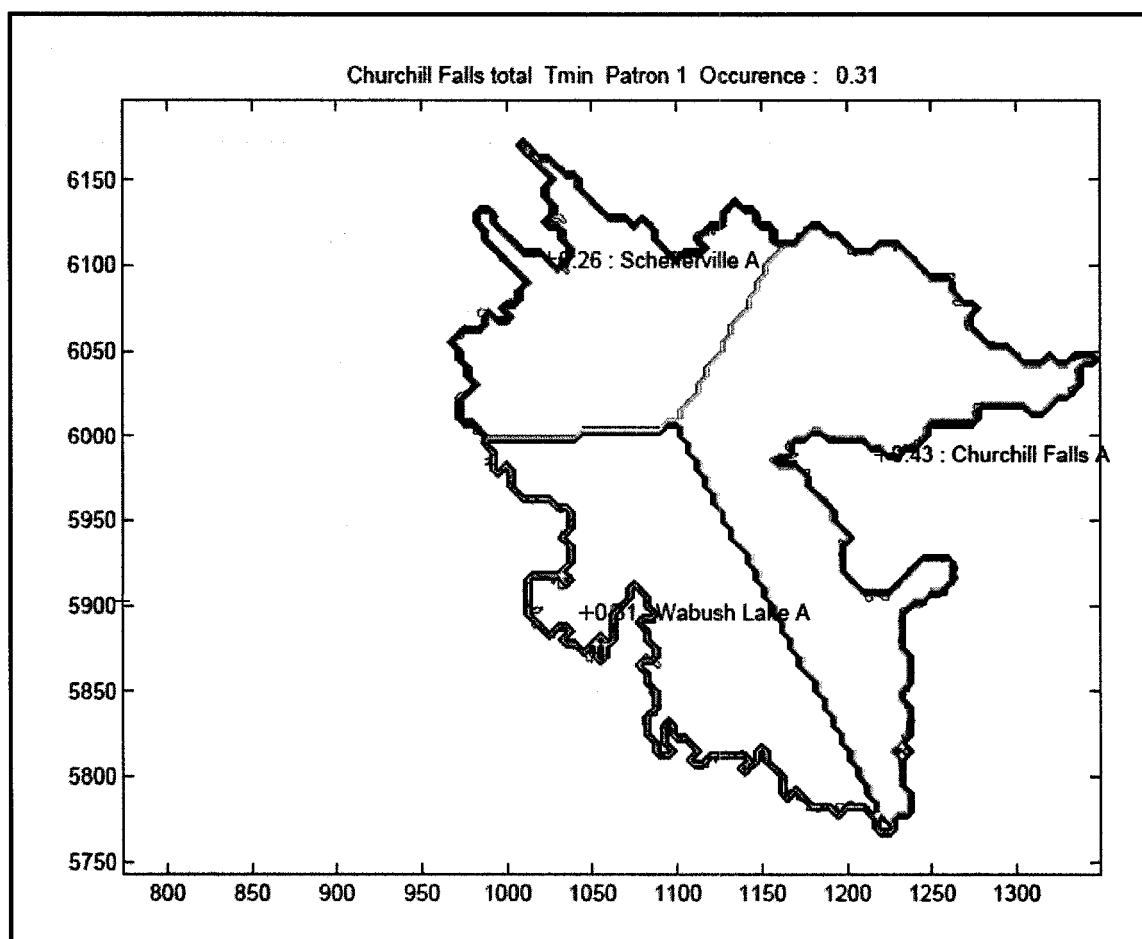


Figure 3.12 *Exemple type de patron météorologique pour Churchill Falls.*

3.3.6 Superficie utilisée pour les maillages des modèles climatiques

En ce qui a trait à la projection future du climat, la principale source de questionnement sur la véracité des apports simulés reste l'ambiguïté de la surface terrestre à utiliser pour les modèles climatiques. Le problème concerne en fait la variabilité des points de grille des modèles globaux. Ces derniers sont divisés de manière totalement différente, intégrant ainsi un étalement de valeurs d'incrémentations de l'ordre de 2,50 à 5,60 degrés en latitude et en longitude. Un seul bassin peut alors se concentrer sur un unique maillage. Toutefois, selon Von Storch et *al.* (1993), il est essentiel d'utiliser un plus

grand nombre de points de grille (au moins quatre mailles). Comment alors obtenir des paramètres représentatifs de chacun des bassins? Doit-on également employer le même nombre de mailles pour les trois bassins à l'étude? Afin de permettre une comparaison adéquate des résultats des trois territoires et puisque ces derniers sont relativement proches l'un de l'autre, la solution employée a été de considérer la même surface pour chaque bassin analysé.

Une surface rectangulaire identique pour chaque modèle a été déterminée, englobant les trois bassins hydrologiques. Selon les modèles, la surface comprend entre trois (exemple: CCSRNIES) et six (exemple: ECHAM4) points de grilles. Puisque ceux-ci ne sont pas inclus totalement dans la surface, une pondération des valeurs a donc été faite selon la superficie de la portion du maillage recouverte par cette aire d'étude.

L'approche consiste en fait à délimiter une aire rectangulaire englobant les trois bassins hydrologiques. Lors de cette étude, les bornes ont été imposées à -71° et $-63,5^\circ$ en coordonnées longitudinales, de même qu'à 51° et 55° en latitude. Ensuite, selon les dimensions et les coordonnées du maillage de la grille du modèle choisi, il suffit d'évaluer le ratio P_i et P_j d'interception en latitude et en longitude d'un point de grille avec la surface. L'équation suivante est valable autant pour le calcul en longitude i qu'en latitude j . Elle peut être écrite comme suit :

$$P_i = \frac{\min \left(\min \left(\max \left(v_i + \frac{inc_i}{2} - dom_{(1)} \right), 0 \right), \max \left(dom_{(2)} - (v_i - \frac{inc_i}{2}) \right), 0 \right)}{inc_i} \quad (3.6)$$

où v_i (ou v_j) correspondent aux coordonnées en longitude i (ou en latitude j) au centre de chaque point de grille des modèles. Pour aider à la compréhension, les maillages des modèles sont représentés à l'annexe I. Les coordonnées des mailles sont sommées ou soustraites à la moitié de l'incrément inc_i (ou inc_j) des grilles en longitude (ou en latitude). Puis, le tout est soustrait du domaine limite du territoire dom , soit les coordonnées minimales $dom_{(1)}$ et maximales $dom_{(2)}$ imposées de la superficie à l'étude.

Puis, les ratios en longitude et en latitude de chaque maille x (où $x = 1, 2, 3, \dots, n$) sont multipliés entre eux et, par la suite, fractionnés à la superficie totale.

$$P_x = \frac{(P_i \cdot P_j)}{\sum_{x=1}^n P_i \cdot P_j} \quad (3.7)$$

Enfin, pour calculer les variables climatiques du bassin, les surfaces, correspondant aux maillages inclus dans la superficie rectangulaire, sont sommées entre elles, après avoir chacune été corrigée selon la proportion de la grille P_x par rapport à toute la superficie du territoire délimité. Ainsi, on peut écrire cette équation comme suit :

$$param_{xcorr} = \sum_{x=1}^n param_x \cdot P_x \quad (3.8)$$

où $param_{xcorr}$ est le paramètre climatique correspondant à la somme de toutes les données des maillages corrigés et $param_x$ est le paramètre du maillage x . Afin de bien comprendre ce processus d'équations, un exemple de calculs est présenté à l'annexe III.

3.4 Résumé de la procédure de modélisation

Ce présent chapitre fait mention des différentes étapes nécessaires à l'obtention de résultats d'apports selon le climat actuel et futur. Pour améliorer la compréhension de ces processus, les figures 3.13 et 3.14 illustrent les phases de simulation.

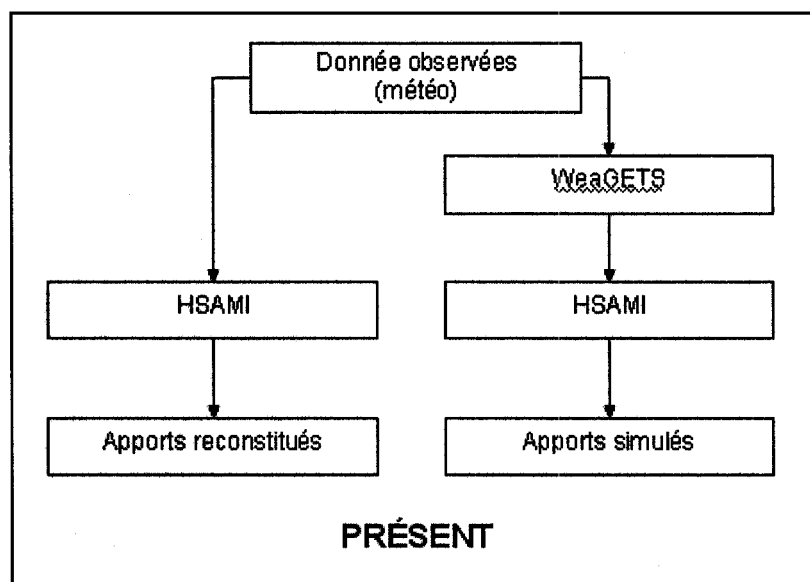


Figure 3.13 *Organigramme des étapes de simulation pour le temps présent.*

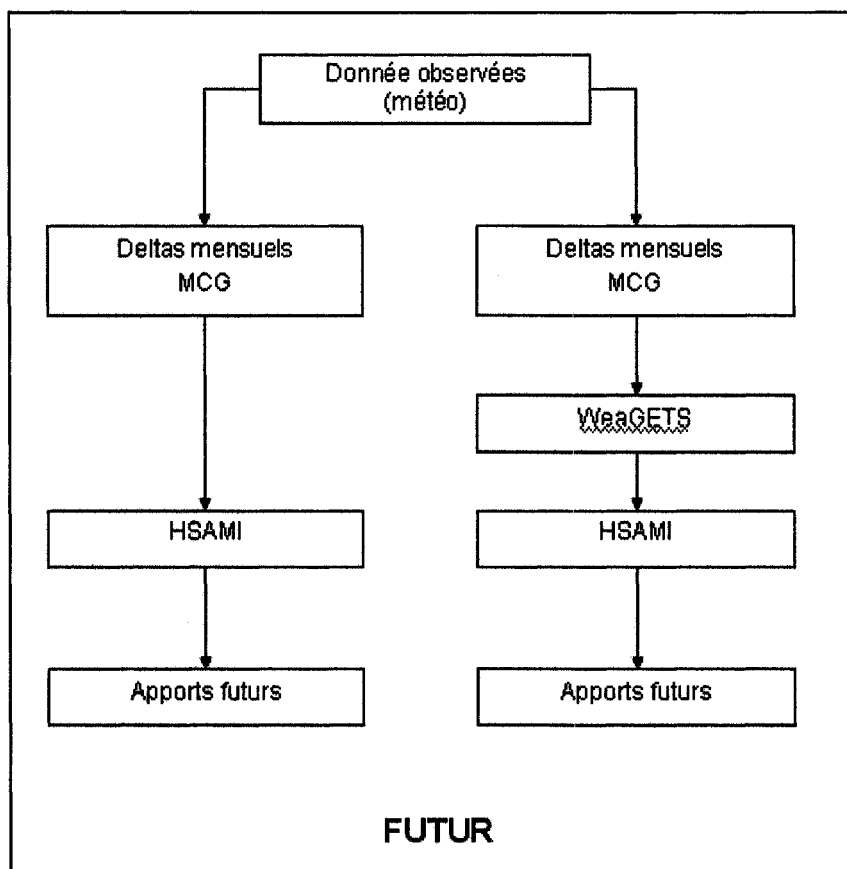


Figure 3.14 *Organigramme des étapes de simulation pour le temps futur.*

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats d'apports d'eau et de température générés par les différents modèles et scénarios climatiques après avoir été incorporés dans le modèle HSAMI. L'utilisation d'une fourchette de résultats était nécessaire car chacun des modèles globaux, qui eux, comportent de nombreuses réalisations, se distingue dans son fonctionnement tout comme dans son processus de « forçage ». Dans ce type de recherche, il est impossible de donner une solution certaine, mais plutôt une tendance générale ou un ensemble de possibilités.

4.1 Résultats des modèles climatiques

Pour évaluer d'abord la tendance d'un modèle et scénario par rapport à un autre, il peut être utile d'observer leurs anomalies en température et en précipitation par l'emploi d'un outil du CICS. Ce dernier évalue tous les modèles et scénarios pour un endroit précis, selon ses coordonnées en latitude et longitude données, et pour un horizon spécifique. Selon la figure 4.1, on remarque que les scénarios du HadCM3 ont une tendance à donner, pour un horizon 2050 et pour des coordonnées près de la région à l'étude, des résultats beaucoup plus froids et plus humides que les autres modèles. Le modèle australien, quant à lui, est présenté comme celui qui évalue le futur plus chaud et qui prédit plus de précipitation que l'ensemble. Le modèle CGCM2 conçu au Canada génère des valeurs plus froides et plus sèches que la moyenne. Enfin, les modèles allemand et japonais démontrent que les anomalies en température seront beaucoup plus importantes, mais présageant une croissance plus faible en précipitation que les autres modèles. Ainsi, comme on peut le constater à la Figure 4.1, même si les scénarios d'un même modèle diffèrent entre eux, ils évaluent le futur selon une même tendance.

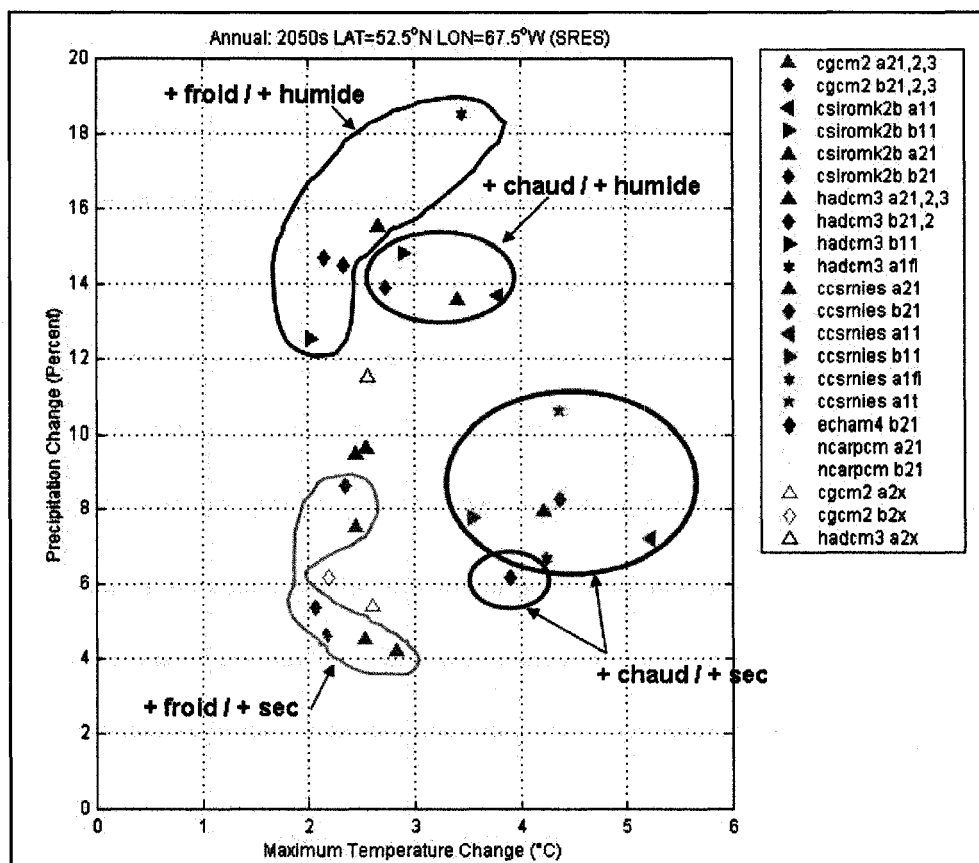


Figure 4.1 *Anomalies annuelles de la température maximale et des précipitations (horizon 2050) pour une région correspondant aux bassins à l'étude. (CICS, 2006)*

Cette dernière se remarque également aux figures 4.2 à 4.4 où l'on évalue l'évolution des changements en termes de précipitation, de température maximale et de température minimale à travers le temps. Les anomalies présentées dans ces illustrations ont été calculées selon une moyenne mobile de trente années appliquée sur la période entière des scénarios, sans distinction entre les mois. Elle permet d'éliminer certains « bruits » et de donner une meilleure représentation de la tendance. Il est important de spécifier que cette méthode n'a pas été employée dans le calcul des apports futurs, mais n'est qu'un outil permettant d'observer l'évolution du réchauffement pour la période 1960 à 2100. De plus, ces figures permettent de confirmer les constats de la Figure 4.1

présentée auparavant. L'évolution mensuelle des scénarios, pour la précipitation et les températures maximales et minimales, est présentée à l'annexe IV.

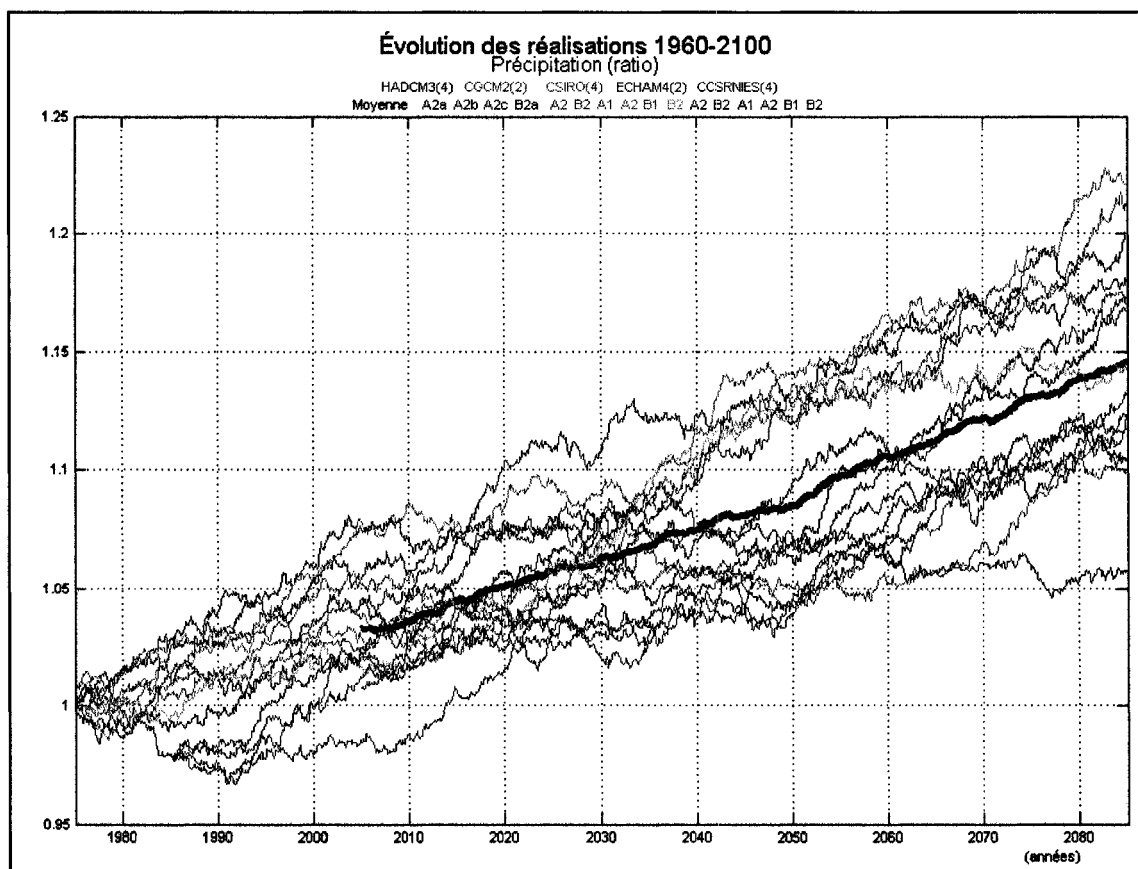


Figure 4.2 *Évolution des deltas des 16 scénarios pour la précipitation.*

En ce qui a trait aux précipitations, on remarque encore une fois que les scénarios des modèles CSIRO et HadCM3 sont les plus humides, possédant des anomalies au-dessus de l'évolution moyenne représentée par la ligne foncée. Le modèle CCSRNIES, quant à lui, indique peu d'accroissement de cette variable.

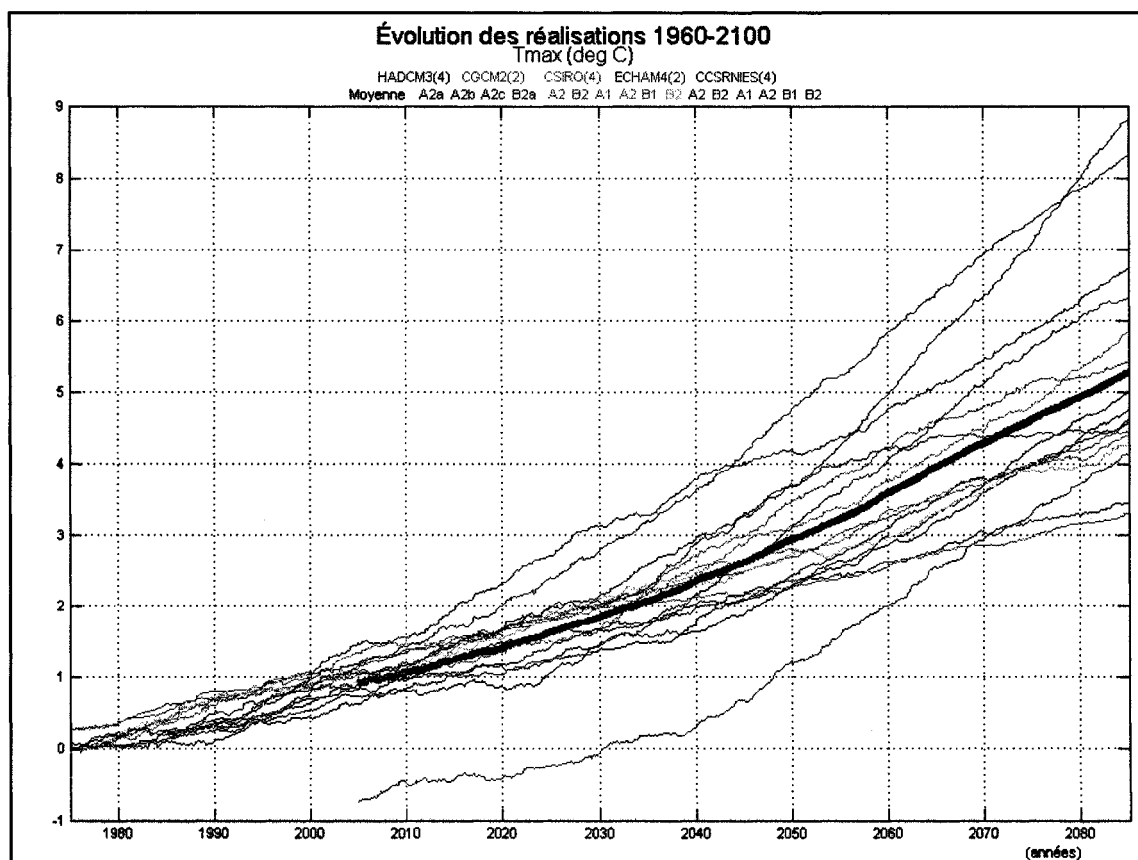


Figure 4.3 *Évolution des deltas des 16 scénarios pour la température maximale.*

En observant la Figure 4.3, on constate que le scénario A2 de ECHAM 4 prédit au départ un refroidissement de la température maximale avant de rejoindre les autres scénarios. Il est difficile d'établir si cette situation est normale ou non puisqu'il est impossible de se comparer à d'autres références. En effet, la Figure 4.1, provenant du CCIS, ne présente que le scénario B2. Ce dernier apparaît ici correctement dans son évolution. De plus, on peut remarquer que les données correspondantes aux réalisations d'ECHAM 4 ne sont disponibles que depuis 1990 (sur la figure, le delta de l'année 2005 est produit avec une moyenne mobile de 30 ans, soit de 1990 à 2020). Le « baseline » a été récupéré sur le site du CCIS et intégré dans la simulation. Toutefois, seul celui du scénario B2 est disponible. Le même « baseline » a donc été employé pour les deux réalisations, ce qui n'est pas nécessairement conforme.

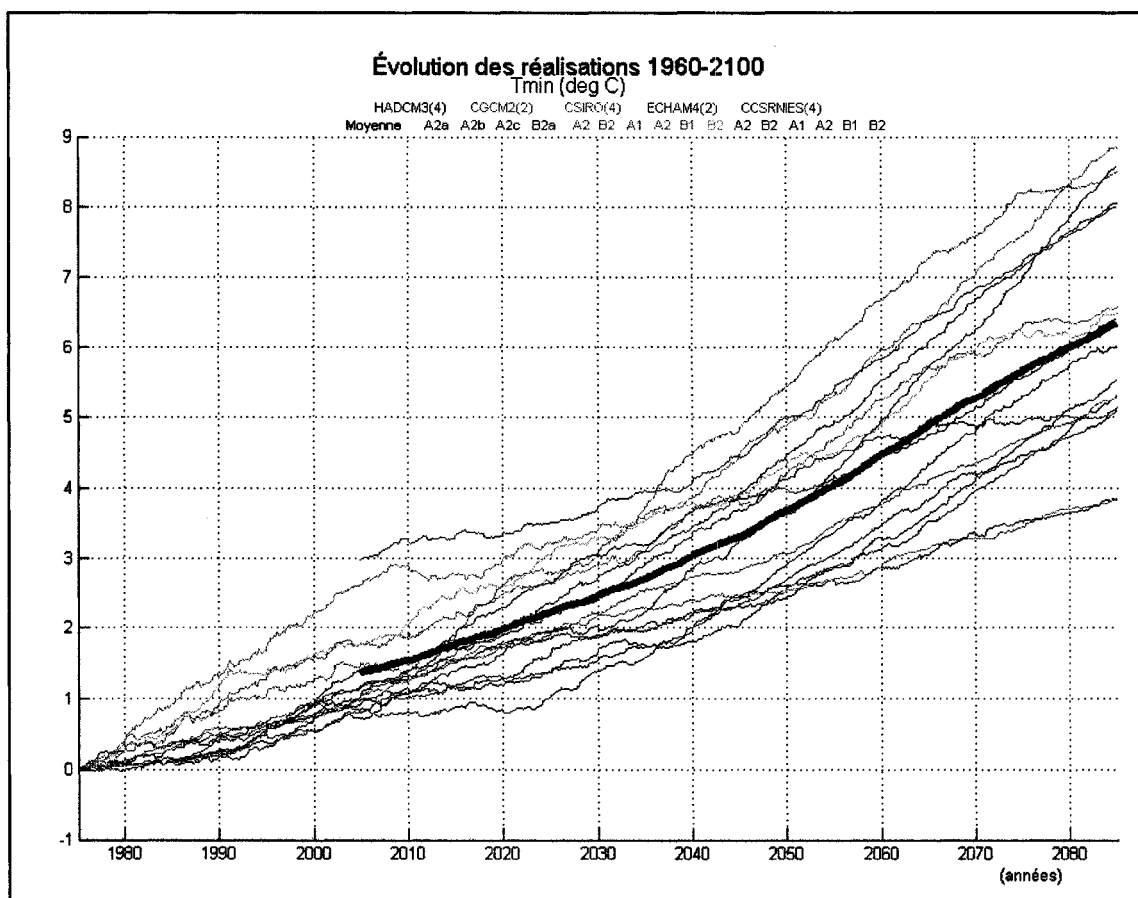


Figure 4.4 *Évolution des deltas des 16 scénarios pour la température minimale.*

La Figure 4.4 illustre l'évolution des anomalies de la température minimale. On constate une forte hausse pour les scénarios CSIRO et CCSRNIES, de même que pour les réalisations d'ECHAM 4. Enfin, il est possible de remarquer sur les figures 4.2 à 4.4 quatre groupes très distincts entre les scénarios : les chauds (CSIRO et CCSRNIES) et les moins chauds (CGCM2 et HadCM3), les secs (CGCM2 et CCSRNIES) et les humides (HadCM3 et CSIRO).

4.2 Résultats des apports d'eau pour les bassins versants à l'étude

La Figure 4.5 présente les hydrogrammes moyens générés pour l'horizon 2050, en comparaison avec l'hydrogramme reconstitué du présent. Le terme reconstitué indique que les valeurs climatiques observées d'un réservoir donné ont été incorporées dans le modèle hydrologique sans ajout d'anomalies. Même s'il existe des incertitudes dans les résultats générés causées par les limites et le calibrage du modèle HSAMI, la série d'apports correspondant au présent donne une bonne approximation de la réalité et est employée comme un excellent élément comparatif. Les résultats obtenus pour les bassins de Manic 5 et de Caniapiscau sont présentés à l'annexe V.

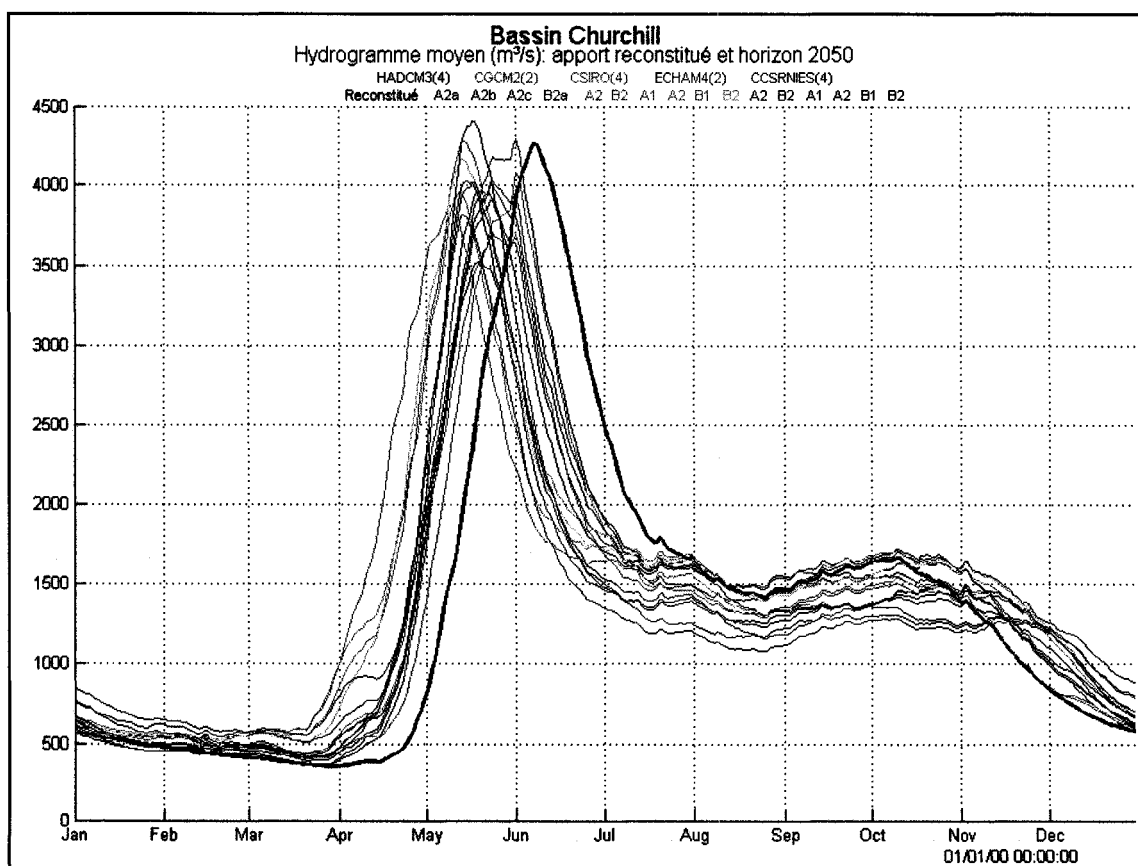


Figure 4.5 *Hydrogrammes moyens des scénarios climatiques pour Churchill Falls.*

Comme il a été mentionné dans les chapitres précédents, les anomalies de l'horizon 2050 en température et en précipitation sont la moyenne des trente années de la période 2040-2069. Pour chaque valeur observée d'un même mois, la même anomalie mensuelle lui est ajoutée. Cette procédure est plus ou moins exacte mais donne une bonne idée de la tendance générale des modèles. En effet, cette procédure ne fait qu'enlever le « bruit » mensuel causé par une plus grande précision des anomalies, ce qui est acceptable dans notre cas puisque l'analyse s'effectue surtout sur l'ensemble d'une année et sur la tendance des événements annuels telle que la fonte printanière ou la période d'étiage. Toutefois, une recherche plus approfondie devrait être réalisée sur cet aspect afin d'élaborer un algorithme capable de « morceler » les résultats mensuels des MCG en pas de temps journalier, tout en conservant les mêmes propriétés statistiques. Geng et *al.* (1986) de même que Elshamy et *al.* (2006) proposent l'utilisation du générateur de climat (Richardson, 1981) comme outil de « désagrégation » pour les précipitations seulement.

En analysant toujours la Figure 4.5, on remarque que la tendance générale de tous les modèles et scénarios indique une précocité de la crue printanière se produisant lors d'une année. L'hydrogramme reconstitué présente la moyenne journalière des quarante-trois années de valeurs climatiques observées pour le bassin de Churchill Falls. Il est à mentionner que les figures de ce chapitre présentent les résultats du bassin de Churchill Falls seulement puisque les hydrogrammes des autres bassins illustrent des tendances similaires. Cette décision permet simplement d'alléger le rapport.

On observe tout d'abord que les apports en janvier, février et mars sont majoritairement plus élevés que ceux de la série reconstituée. De plus, la crue annuelle causée par la fonte printanière est beaucoup plus précoce en moyenne de 6 à 29 jours par rapport à l'hydrogramme reconstitué. Toutefois, la quantité d'eau future est dans l'ensemble plus basse que maintenant. Les débits maximums simulés fluctuent entre 737 m³/s sous le débit maximal observé et 145 m³/s au-dessus de cette même pointe de crue. Les

modèles annoncent une saison estivale marquée par deux périodes d'étiage, soient en début juillet et à la fin août. L'automne est majoritairement plus sec pour l'ensemble des modèles, mais ces derniers présentent un début hivernal où le débit est plus élevé.

La Figure 4.6 illustre l'hydrogramme moyen des écarts, c'est-à-dire la différence journalière entre l'apport horizon 2050 de chaque modèle et celui reconstitué des données observées. Afin d'établir une base identique pour chaque journée de l'année, un ratio, identifié en pourcentage, entre les variations et la moyenne annuelle reconstituée est calculé. Cette figure permet de visualiser clairement les anomalies journalières de chaque simulation effectuée. D'après les résultats, on observe, pour les scénarios de CSIRO et CCSRNIES, une plus grande amplitude dans les événements hydrologiques saisonniers, telle que la fonte printanière et la période d'étiage estivale. Cette situation confirme les hypothèses de départ, c'est-à-dire que le CCSRNIES et le CSIRO sont parmi les modèles les plus chauds selon le CCIS. De plus, puisque les projections climatiques du modèle japonais indiquent un faible accroissement de précipitation, il est justifiable de constater une période d'étiage beaucoup plus sévère. En ce qui a trait au modèle australien, ses fortes précipitations projetées confirment sa crue printanière beaucoup plus importante que les autres. Comme autre constatation, on remarque une moins grande variation saisonnière pour les modèles anglais (HadCM3) et canadien (CGCM2). Encore une fois, cette situation est expliquée par leurs prévisions climatiques qui énoncent des anomalies plus faibles en termes de température que les autres modèles globaux. Bien que le modèle HadCM3 possède les scénarios les plus humides, on ne remarque pas d'influence particulière à cet égard. Même s'il existe des divergences en termes de quantité entre les modèles et scénarios, on peut affirmer que ces derniers génèrent des tendances très similaires en ce qui concerne les apports horizon 2050. Les résultats obtenus pour les bassins de Manic-5 et de Caniapiscou sont présentés à l'annexe V.

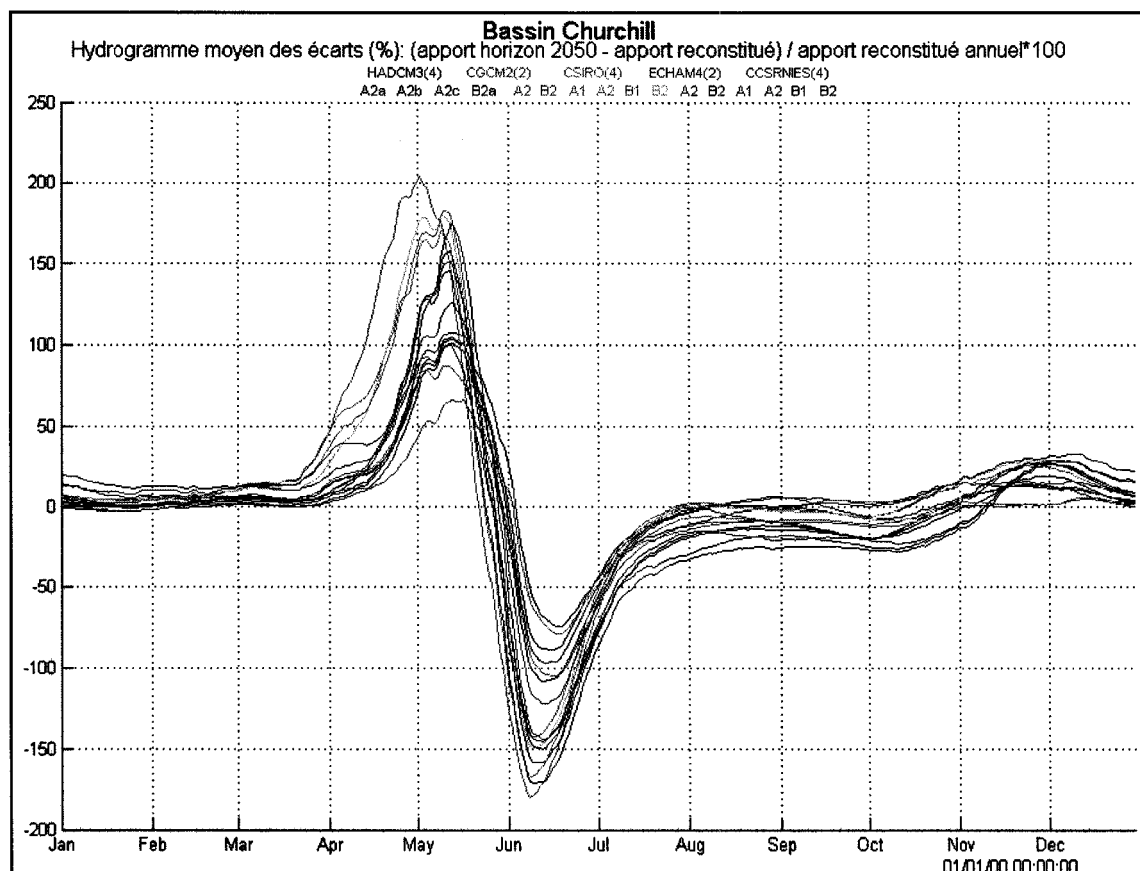


Figure 4.6 *Hydrogrammes moyens des écarts entre les apports simulés et reconstitués.*

Bien que la présente étude soit consacrée aux résultats de l'horizon 2050, il est quand même intéressant d'observer l'évolution des impacts causés par les changements climatiques à travers le temps. La Figure 4.7 donne un aperçu des variations interannuelles pour chaque horizon afin de permettre leur comparaison. Ces volumes sont la moyenne des 16 scénarios climatiques. Fait à noter, les horizons décrits dans cette figure ne sont pas seulement ceux établis par le GIEC. En effet, puisque les modèles climatiques détiennent des données mensuelles correspondant à toutes les années comprises entre le « baseline » et 2100, il est possible d'établir une courbe correspondant à la moyenne de trente années telle une moyenne mobile. À cet effet, on remarque un horizon 1980 sur la figure, représentant la moyenne des années 1965 à

1995. Il est vrai que l'horizon 2050 (2035 à 2065) calculé ainsi ne correspond pas tout à fait à celui du GIEC, soit des années 2040 à 2069. Toutefois, cet intervalle est considéré négligeable puisque qu'il est considéré petit. De plus, la valeur recherchée est la moyenne tendancielle, ce qui élimine les variations extrêmes entre les années. En ce qui a trait aux figures pour Manic 5 et Caniapiscau, elles sont présentées à l'annexe V.

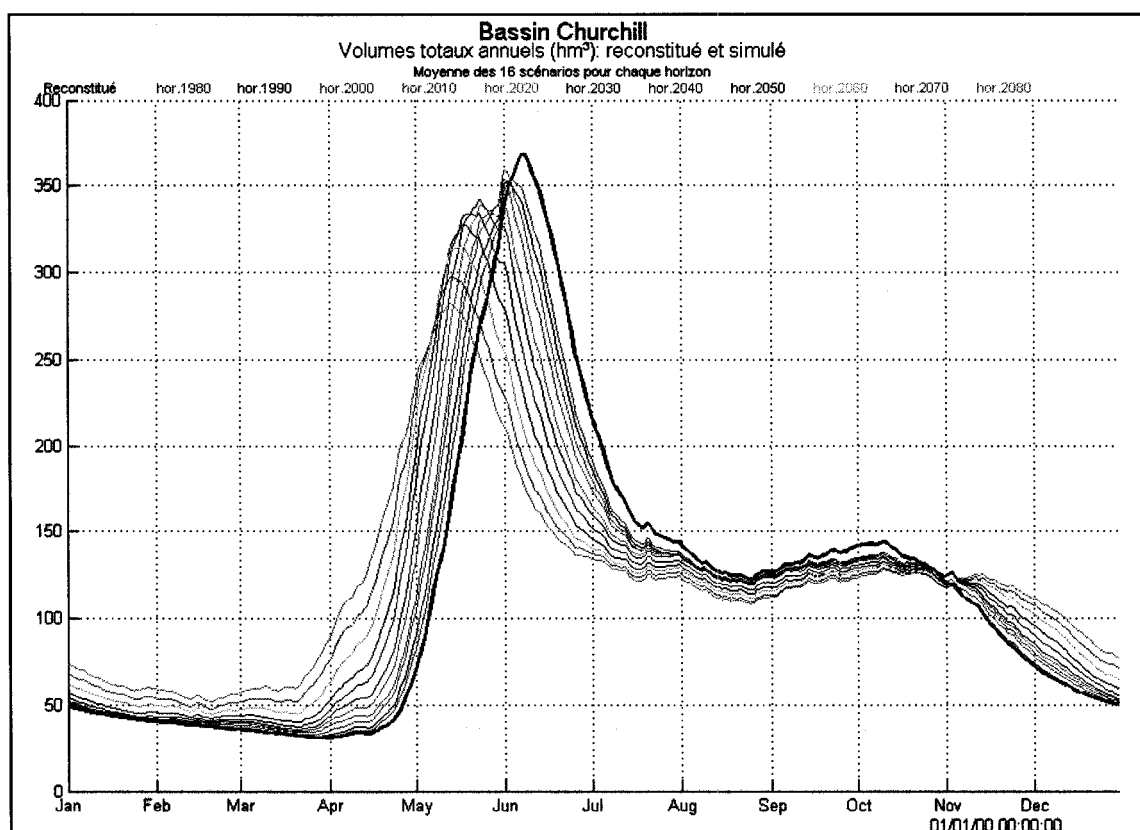


Figure 4.7 Évolution des volumes d'eau de l'horizon 1980 à 2080 selon la moyenne des 16 projections climatiques

On remarque à la figure 4.7 que plus la période temporelle s'éloigne de celle de la courbe reconstituée, soit de 1972 à 2002, plus les volumes s'éloignent également des valeurs générées avec la série observée. Par ce fait, on distingue une précocité de la crue printanière avec le temps, mais de quantité décroissante. On remarque encore une fois les deux périodes d'étiage en été qui sont de plus en plus définies avec le temps. Elles

sont séparées par une petite pointe probablement causée par des événements convectifs estivaux. De plus, l'automne sera beaucoup plus sec et l'hiver plus humide. Enfin, il est possible de remarquer un certain écart entre la courbe horizon 1980 et celle des données observées reconstituées, surtout en ce qui a trait à la crue printanière. Puisque l'horizon 1980 désigne une période près du « baseline », les anomalies calculées doivent être près de 0 pour les températures et 1 pour les précipitations. Il est peut-être possible que durant les cinq années qui séparent l'horizon et le « baseline », une fluctuation plus significative du climat ait été remarquée, surtout durant la saison estivale. Le modèle hydrologique en tant que tel ne peut avoir d'influence sur les résultats, car le même calibrage est employé pour toutes les simulations. L'annexe VI illustre les deltas de précipitation et de températures horizon 1980 pour tous les modèles et scénarios. On remarque que les scénarios des modèles HadCM3 et surtout de CSIRO présentent des écarts plus considérables pour les anomalies de précipitation, de température minimale et maximale. Cet écart de volume est donc possible et inévitable entre autres à cause des différences d'échelle et de paramétrisation des modèles.

La figure 4.8 présente l'évapotranspiration potentielle calculée pour chaque scénario de l'horizon 2050. Il s'agit de l'évaporation qui se produirait si l'approvisionnement en eau répondait aux besoins de la végétation. Il désigne également l'évaporation maximale susceptible d'être produite sous un climat donné. Cette variable est estimée dans HSAMI à partir d'une relation empirique basée sur la température maximale et minimale. En la convertissant sous forme métrique, l'équation peut s'écrire comme suit :

$$ETP = 0,0029718(T_{\max} - T_{\min}) \exp\{0,0342(T_{\max} + T_{\min}) + 1,216\} \quad (4.1)$$

où les températures sont mesurées en degrés Celsius et l'ETP en cm/24hre.

En observant les résultats, on peut constater une certaine augmentation de l'évapotranspiration durant la période hivernale. Elle est causée par l'équation utilisée dans le modèle qui emploie l'écart (et l'ajout) entre la température maximale et

minimale. Si la différence est positive, l'évapotranspiration sera également au-dessus de 0. De plus, on considère qu'il existe une sublimation de la neige sèche durant cette période. On remarque également qu'une des courbes du modèle climatique ECHAM4 est sous la courbe reconstituée des données observées. Cette situation s'explique par le fait que l'anomalie de la température minimale est supérieure à celle de la température maximale au même temps, diminuant ainsi l'écart des variables observées au bassin. Pour confirmer les résultats illustrés dans les figures précédentes, on remarque une forte évapotranspiration en mai pour les modèles CSIRO et CCSRNIES. En effet, comme il est démontré à l'annexe IV, ils sont considérés comme les modèles les plus chauds, surtout durant ce mois printanier, où les températures maximales sont environ 6°C au-dessus des autres scénarios. Les figures de Manic 5 et Caniapiscau sont illustrés à l'annexe V.

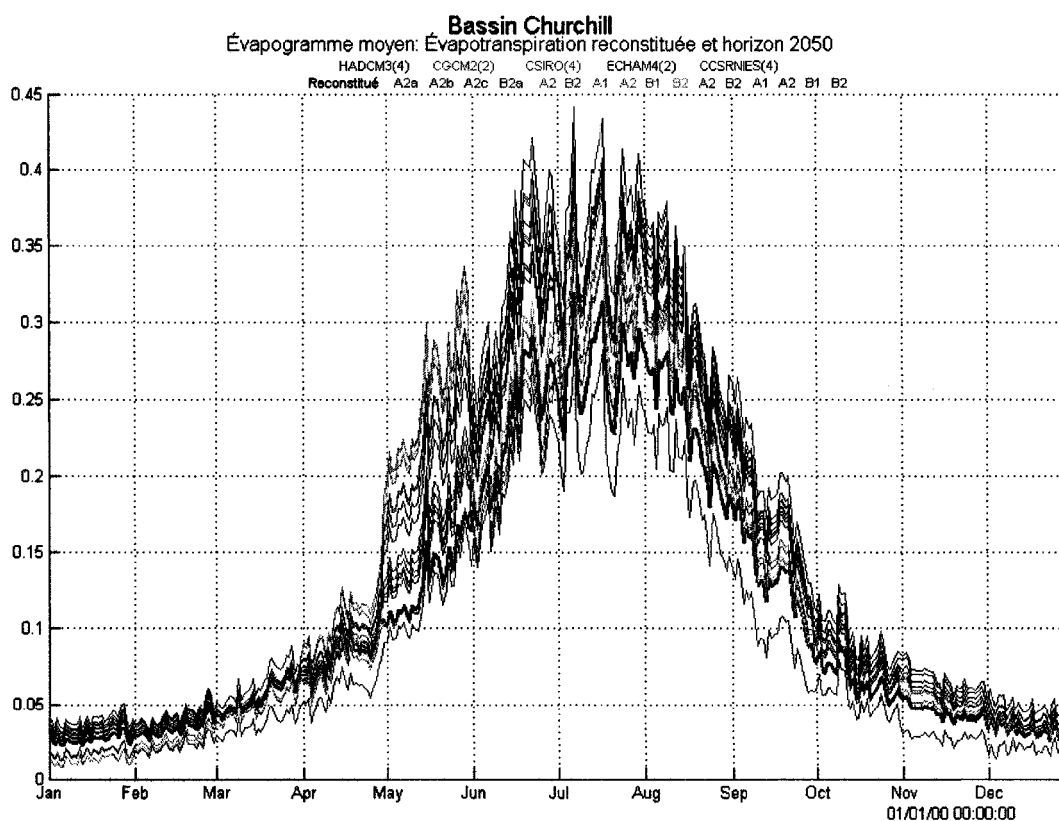


Figure 4.8 *Évapotranspiration potentielle reconstituée et simulée pour l'horizon 2050 pour le bassin Churchill (cm/d).*

Les résultats engendrés par cette approche peuvent être considérés comme discutables en raison de la forte incertitude reliée aux méthodes empiriques. Ces dernières, que l'on surnomme des « boîtes noires », n'essaient pas de modéliser les lois physiques d'une variable, mais se contentent de rapprocher les données d'entrées et de sorties. Les outils empiriques s'avèrent généralement de piètres extrapolateurs. Ils sont donc à utiliser avec prudence en dehors de la gamme de valeurs pour laquelle ils ont été calibrés (Gaume, 2005).

CHAPITRE 5

AMÉLIORATION DE LA PROCÉDURE DU GÉNÉRATEUR STOCHASTIQUE DU CLIMAT

Selon Barrow et Lee (2000), on doit accorder peu de confiance aux données quotidiennes provenant des expériences de MCG. En fait, ces valeurs ne devraient pas être utilisées dans les études de scénarios. Pour obtenir les données journalières, il faut appliquer des scénarios mensuels à des séries chronologiques quotidiennes de données d'observation, ce qui a été présenté au chapitre 4, ou encore employer un générateur de climat qui synthétise les données climatiques journalières artificielles d'un scénario particulier, approche introduite dans ce présent chapitre.

5.1 Définition d'un générateur de climat

Le générateur de climat produit des séries synthétiques qui sont basées sur des observations climatiques telles que la température maximale et minimale journalière, les précipitations, de même que les radiations solaires. De plus, ce type de modèle est habituellement conçu pour effectuer une distinction entre les journées pluvieuses et sèches, tout en appliquant une corrélation croisée avec décalage entre les séries de variables. Le processus de génération des séries climatiques est basé sur l'application d'un nombre aléatoire, selon la distribution de probabilité choisie (composante stochastique). Cette méthode est avantageuse puisqu'elle permet la génération de plusieurs séries chronologiques quotidiennes différentes représentant le scénario. En fait, ces séries ont toutes les mêmes caractéristiques statistiques, mais elles diffèrent sur une base quotidienne. Cette technique permet aux chercheurs d'effectuer, entre autres, des analyses de risque. Comme type de générateur de climat, on retrouve les modèles paramétriques comme le WGEN (Richardson et Wright, 1984) et le CLIGEN (Nicks et Gander, 1994), les semi-paramétriques (LARS-WG (Semenov et Barrow, 1997)) et les non-paramétriques (échantillonnage Bootstrap). Dans cette présente étude, un modèle paramétrique a été employé et perfectionné.

5.2 Application du générateur de climat WeaGETS

Le générateur de climat expérimental WeaGETS (Caron, 2006), créé par le D.R.A.M.E. (Développement et recherche appliqués en modélisation environnementale) à l'ÉTS, a été utilisé comme outil pour produire une multitude de séries climatiques à introduire dans le modèle HSAMI. En effet, il a été possible de vérifier sa rigueur pour simuler des séries synthétiques de paramètres climatologiques, tels que les occurrences et les quantités de précipitation journalière, de même que les températures maximales et minimales journalières. Le générateur simule également les radiations solaires. Toutefois, un grand nombre de stations météorologiques ne mesurent pas cette variable. De ce fait, cette dernière n'a été pas été considérée dans les calculs. Cette décision n'est point problématique pour le modèle hydrologique puisque ce paramètre n'est pas intégré dans le processus de simulation des apports d'eau de HSAMI.

5.2.1 Conception originale

Le générateur de climat WeaGETS est conçu en s'inspirant de l'approche de Richardson (1981). Il consiste à une production de séries synthétiques des données climatiques basée sur une structure stochastique des processus météorologiques. Comme il a été mentionné précédemment, les calculs analytiques de cette méthode reposent sur la reproduction des séries de précipitation, de température maximale et minimale, ainsi que du rayonnement solaire journalier.

Le générateur créé par l'ÉTS est fractionné en deux sections. La première calcule les paramètres numériques qui caractérisent les variables climatiques (pour des périodes de 14 jours) et la seconde génère de façon aléatoire des séries synthétiques statistiquement identiques aux données observées. Afin de réaliser une analyse adéquate de la

représentativité de ces séries, elles doivent être simulées sur de longues périodes (Zhang et Singh, 2004; Semenov et *al.* 1998).

Les précipitations observées sont produites en évaluant deux aspects importants : l'occurrence de la précipitation et sa quantité. L'occurrence des journées pluvieuses et sèches est établie selon une chaîne de Markov de premier ordre. Selon Richardson (1981), une journée est considérée pluvieuse lorsque la quantité de précipitation dépasse 0,20 mm. Ce seuil est pour le moins arbitraire puisque de nombreuses recherches l'établissent différemment. C'est le cas de Busuioc et von Storch (2003) et de Corte-Real et *al.* (1999), qui emploient un seuil de 0,10 mm, de Wilks (1998) qui désigne ce critère à 0,254 mm et de Buishand et Brandsma (1999) qui considèrent une journée pluvieuse lorsque la quantité de précipitation dépasse 0,30 mm. Lors de ce projet, un seuil de 0,25 mm a néanmoins été imposé.

De manière analytique, une chaîne de Markov est établie pour améliorer l'occurrence de la précipitation selon les deux équations suivantes :

$$P_i(D/W) = 1 - P_i(W/W) \quad (5.1)$$

$$P_i(D/D) = 1 - P_i(W/D) \quad (5.2)$$

La variable $P_i(W/W)$ désigne la probabilité d'avoir une journée pluvieuse au jour i alors que la journée précédente $i-1$ est pluvieuse également. De même, la variable $P_i(W/D)$ désigne la probabilité d'avoir une journée pluvieuse au jour i alors que la journée précédente $i-1$ est sèche.

Dans le cas présent, le modèle WeaGETS a été développé selon une chaîne de Markov de troisième ordre (Caron, 2006). Cette approche est établie sur 16 équations qui

calculent les probabilités d'avoir des journées pluvieuses et/ou sèches sur une série de quatre jours consécutifs.

La quantité de précipitation est habituellement distribuée par une fonction de distribution exponentielle ou une gamma (Richardson, 1981; Wilks, 1999a; Kysely & Dubrovsky, 2005, Parlange & Katz, 2000). Ces deux lois permettent de représenter adéquatement les petites valeurs et celles considérées moyennes, dont la proportion de l'échantillon est plus grande. Toutefois, la représentativité des fortes quantités, soient les « extrêmes », est difficilement établie par l'emploi de ces distributions.

Les séries de températures maximales et minimales, de même que les taux d'ensoleillement, sont originalement modélisées dans WeaGETS selon une loi normale. En fait, peu de scientifiques se sont penchés sur ces variables, considérant la distribution normale comme adéquate et représentative approximativement. L'approche de Richardson utilise le modèle développé par Nicks (1975) pour générer des valeurs journalières de températures. Celui-ci est basé sur l'idée qu'il existe une corrélation entre la moyenne et l'écart-type d'une température et l'occurrence de précipitation d'une journée (si elle est pluvieuse ou sèche). Pour simuler les températures, l'étude utilise la technique de Yevjevich (1972) qui consiste à transformer les paramètres en résidus normalisés :

$$x_{p,i}(j) = \frac{X_{p,i}(j) - \bar{X}_i^0(j)}{\sigma_i^0(j)} \quad \text{où } Y_{p,i} = 0 \quad (5.3 \text{ a})$$

ou

$$x_{p,i}(j) = \frac{X_{p,i}(j) - \bar{X}_i^1(j)}{\sigma_i^1(j)} \quad \text{où } Y_{p,i} > 0 \quad (5.3 \text{ b})$$

Les variables $\bar{X}_i^0(j)$ et $\sigma_i^0(j)$ sont la moyenne et l'écart-type pour une journée sèche ($Y_{p,i} = 0$). $\bar{X}_i^1(j)$ et $\sigma_i^1(j)$ sont la moyenne et l'écart-type pour une journée pluvieuse ($Y_{p,i} > 0$). $x_{p,i}(j)$ représente le résidu de la variable j pour l'année p .

Le modèle est également développé sur le principe qu'une interdépendance, une autocorrélation et une corrélation sérielle existent entre les températures minimales et maximales. En ce sens, on calcule d'abord les matrices de covariance d'ordre 0 (M_0) et 1 (M_1) entre les résidus de températures maximales ($j=1$) et minimales ($j=2$). Tel que spécifié par Matalas (1967), les séries résiduelles ont une variance égale à 1. Ainsi, M_0 et M_1 sont des matrices contenant les coefficients de corrélation d'ordre 0 et 1. Elles peuvent être inscrites comme suit :

$$M_0 = \begin{pmatrix} 1 & \rho_0(1,2) \\ \rho_0(2,1) & 1 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} \rho_1(1) & \rho_1(1,2) \\ \rho_1(2,1) & \rho_1(2) \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

La variable $\rho_0(j,k)$ est le coefficient de corrélation d'ordre 0 entre les variables j et k . $\rho_1(j,k)$ est le coefficient de corrélation d'ordre 1 entre les paramètres j et k avec la variable k retardée d'une journée par rapport à la variable j . $\rho_1(j)$ est le coefficient autorégressif de premier ordre pour le paramètre j . La matrice M_0 est symétrique puisque $\rho_0(j,k) = \rho_0(k,j)$. Toutefois, la matrice M_1 ne l'est point car $\rho_1(j,k) \neq \rho_1(k,j)$ (Richardson, 1981).

Les matrices M_0 et M_1 sont utilisées pour le calcul de deux matrices A et B . Ces dernières sont constituées de coefficients qui permettent de préserver les autocorrélations et les corrélations désirées. Ces matrices peuvent être déterminées comme suit :

$$A = M_1 \cdot M_0^{-1} \quad (5.6)$$

$$BB' = M_0 - M_1 \cdot M_0^{-1} \cdot M_1' \quad (5.7)$$

Les exposants -1 et « ' » représentent l'inverse et la transposée de la matrice. Young (1968) suggère une solution qui assume que B est une matrice triangulaire inférieure, c'est-à-dire que les valeurs au-dessus de la diagonale principale sont nulles. Ainsi BB' est symétrique.

Les matrices A et B sont ensuite incorporées dans l'équation qui permet de générer des séries résiduelles des températures maximales et minimales (Matalas, 1967). L'équation est la suivante :

$$x_{p,i}(j) = A \cdot x_{p,i-1}(j) + B \cdot \varepsilon_{p,i}(j) \quad (5.8)$$

Les variables $x_{p,i}(j)$ et $x_{p,i-1}(j)$ sont des matrices 2 x 1 pour les journées i et $i-1$ de l'année p . $\varepsilon_{p,i}(j)$ est une matrice 2 x 1 comprenant des variables aléatoires indépendantes qui sont normalement distribuées avec une moyenne égale à zéro et une variance égale à 1.

La méthode de Richardson simule les fluctuations temporelles des probabilités de transition $P_i(D/W)$ et $P_i(D/D)$, de même que les paramètres décrivant les fonctions de

distribution des quantités de pluie et de la température par l'ajustement de séries de Fourier. En effet, puisque ces fonctions sont périodiques, tout comme l'effet des saisons dans une année, les paramètres de la distribution et les probabilités de la chaîne de Markov peuvent être reproduits sur une année. Les paramètres journaliers calculés sont considérés représentatifs de la période sur laquelle le générateur a été calibré (par exemple 30 ans).

Le second processus de calculs produit des séries chronologiques des variables météorologiques qui sont statistiquement similaires aux séries observées ayant servi à calibrer le générateur. Ils permettent de reproduire la variation saisonnière et les quantités journalières des différentes variables climatiques sur de longues périodes d'étude. Le climat est considéré stationnaire durant la période d'étude simulée.

5.2.2 Les limites du modèle

Depuis plusieurs années maintenant, quelques travaux de recherche se sont penchés sur la conception du générateur de climat WeaGETS. De longues séries climatiques journalières observées ont été employées pour valider la calibration et la conception du modèle, provenant notamment des stations de Dorval, Sainte-Clothilde et Sainte-Martine au Québec (Leconte et *al.* 2003). Les réponses du générateur permettaient de conclure à une modélisation acceptable des températures maximales et minimales. En ce qui a trait aux précipitations, on remarque une sous-estimation des quantités extrêmes. Par conséquent, des recherches plus poussées au DRAME ont eu lieu sur cet aspect. On a entre autres tenté d'appliquer des facteurs d'ajustement régionaux aux quantités de précipitation modélisées par les fonctions exponentielle et gamma (Caron, 2006). Aussi, une étude tente d'analyser différentes distributions probabilistes pour reproduire les valeurs de précipitation. Jusqu'à maintenant, la distribution exponentielle mixte et la distribution de Fréchet sont considérées (Robertson et *al.* 2006; Naveau et *al.* 2005; Gilleland & Katz, 2005). Une seconde recherche a permis d'étudier l'application de la

chaîne de Markov de premier ordre comme outil de reproduction de l'occurrence des journées sèches et pluvieuses. Les résultats ont permis d'améliorer le processus de WeaGETS par l'ajout d'une chaîne de Markov de troisième ordre (Caron, 2006). D'ailleurs, cette version a été celle utilisée lors de cette recherche. De plus, pour accentuer la rigueur et le réalisme des résultats sur une échelle de bassin versant, le générateur doit être en mesure de simuler simultanément plusieurs stations météorologiques afin de reproduire efficacement le régime du climat local (Wilks, 1998). Les bassins versants du Québec possèdent effectivement une grande taille où la topographie hétérogène modifie le climat dans certains secteurs. Les précipitations sont considérées d'ailleurs comme un paramètre non négligeable réparti inégalement sur un bassin versant. Une étude à l'ÉTS s'effectue présentement sur ce sujet, cherchant à démontrer qu'une corrélation spatiale permettrait de considérer la dépendance existante entre différentes stations météorologiques limitrophes (Khalili et *al.*, 2007).

La plupart des recherches sont concentrées sur la reproduction des occurrences et des quantités de précipitation, en supposant que les autres paramètres sont simulés adéquatement. Lors de l'application du générateur de climat dans ce projet, une ambiguïté est apparue dans les résultats. En effet, dans environ 4 % des cas, les températures maximales journalières simulées sont inférieures aux températures minimales de la même journée. Cette situation est provoquée par l'utilisation d'une loi normale pour modéliser les résidus de ces variables. Cet aspect a fait l'objet d'une étude dans cette recherche. De plus, il est possible d'observer dans les données simulées une reproduction moins adéquate pour les températures maximales et minimales lors des journées sèches. Une approche pour améliorer ces phénomènes a été analysée; celle-ci ne diminue pas encore le pourcentage de « $T_{max} < T_{min}$ », mais a considérablement corrigé la reproduction des températures minimales et maximales journalières lors des journées sèches. Afin de conserver une constance dans les résultats présentés, le bassin employé dans les essais et validation est celui de la rivière Churchill. Ce dernier

possède dans sa série de 43 ans d'observations une journée où les mesures ont donné une seule valeur de température maximale inférieure à la température minimale.

5.2.3 Amélioration de l'approche théorique

La principale hypothèse employée dans la présente recherche est de supposer que les résidus des séries de températures maximales et minimales ne suivent pas une loi normale, telle que spécifiée par Richardson (1981). Les graphiques de l'annexe VII reproduisent les histogrammes des résidus des températures maximales et minimales lors de journées sèches ou pluvieuses, de même que les distributions des résidus des températures maximales et minimales, journées pluvieuses et sèches confondues (voir Figure 5.1 comme exemple). Les coordonnées en x représentent les résidus des températures maximales, tandis que l'ordonnée à l'origine est représentée par le nombre de fois où les résidus de températures entrent dans un groupe de valeurs spécifique. En observant les graphiques, on peut remarquer que les résidus des températures maximales pour une journée pluvieuse et sèche ne suivent pas vraiment bien une loi normale. Par contre, ce constat s'avère encore plus indéniable pour les courbes des résidus de températures minimales lors des journées sèches et pluvieuses. En effet, on retrouve une asymétrie et un aplatissement des courbes beaucoup plus flagrants.

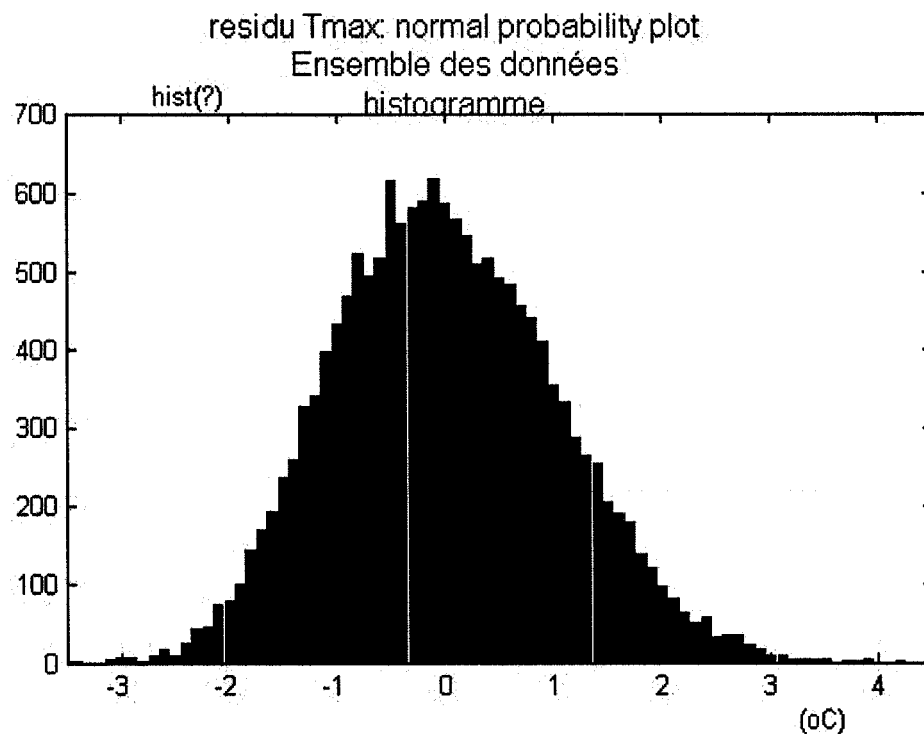


Figure 5.1 *Résidus des températures maximales, journées pluvieuses et sèches confondues.*

Le générateur de climat réalisé avec une chaîne de Markov de troisième ordre (nommé dans ce projet le générateur de climat original) a fait l'objet d'un peaufinage dans sa modélisation des températures maximales et minimales. En effet, une transformation de Box-Cox a été intégrée dans le processus de simulation (Box et Cox, 1964). La méthode consiste à modifier les données observées en valeurs qui sont approximativement distribuées selon une loi normale. La formule peut s'écrire comme suit :

$$y_{\lambda i} = \frac{x_i^{\lambda} - 1}{\lambda}, \quad \lambda \neq 0$$

$$y_{\lambda i} = \log x_i, \quad \lambda = 0$$
(5.9)

où x_i représente les données observées, λ est le paramètre de transformation et $y_{\lambda i}$ sont les données transformées qui suivent une distribution normale. Toutefois, la transformation peut être réalisée seulement si les valeurs observées sont positives. Par ce fait, la formule de Box-Cox peut être modifiée de la façon suivante :

$$\begin{aligned} y_{\lambda i} &= \frac{(x_i + \lambda_2)^{\lambda_1} - 1}{\lambda_1}, & \lambda_1 \neq 0 \\ y_{\lambda i} &= \log(x_i + \lambda_2), & \lambda_1 = 0 \end{aligned} \quad (5.10)$$

où λ_2 est un paramètre de translation.

Pour évaluer la valeur de λ_1 , plusieurs méthodes ont été créées. Cependant, trois approches sont plus communément employées, soient la technique de minimisation de l'asymétrie de la courbe (Kottegoda, 1980), la méthode de maximum de vraisemblance suggérée par Box et Cox (1964) et la méthode de Hinkley (1977) qui s'agit d'une interpolation de λ_1 selon sa moyenne, sa médiane et son écart-type. L'approche de maximum de vraisemblance est la plus efficace des trois méthodes, mais requiert une étape supplémentaire dans le processus afin de vérifier si véritablement les données suivent une loi normale (Lye, 1993).

Une approche a été proposée par Lye (1993) pour évaluer le paramètre de transformation. Il s'agit de maximiser le coefficient de corrélation dans le graphe de probabilité d'une loi normale. Cette technique a été employée dans cette présente étude puisqu'elle est moins fastidieuse dans sa modélisation que la méthode de maximum de vraisemblance. De plus, elle peut en une seule étape rechercher la transformation appropriée et vérifier la répartition normale des données transformées. Selon les résultats de Lye (1993), cette méthode donne des résultats sensiblement identiques à ceux obtenus avec la méthode de maximum de vraisemblance.

La première étape de cette procédure consiste à produire le graphe d'une distribution normale selon Hazen (1914). Ce graphique présente les valeurs observées en ordre croissant et la fonction de distribution cumulative inverse pour une loi normale Z_i . Cette dernière est interprétée comme suit par Schemeiser (1979) :

$$Z_i = 5,0633 \left[p_i^{0,135} - (1 - p_i)^{0,135} \right] \quad (5.11)$$

où p_i est estimée par Blom (1958) :

$$p_i = \frac{i - 0,375}{n + 0,25} \quad (5.12)$$

Dans cette formule, p_i définit la probabilité empirique dont i désigne le rang de la valeur observée et n le nombre de données totales de la série. Lorsque ces dernières sont distribuées normalement, le graphe de la distribution doit produire une ligne droite. Bien que l'interprétation des résultats de cet exercice soit subjective, elle permet d'introduire la théorie produite par Filliben (1975), soit le test de coefficient de corrélation du graphe de la distribution normale. Il évalue la linéarité du graphique précédent par l'application du coefficient de corrélation entre la valeur transformée $y_{\lambda i}$ et la fonction de distribution cumulative inverse pour une loi normale Z_i . La formule du coefficient de corrélation r_λ peut s'écrire comme suit :

$$r_\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{\lambda(i)} - \text{mean}(y_\lambda))(Z_i)}{\left[\sum_{i=1}^n (y_{\lambda(i)} - \text{mean}(y_\lambda))^2 \sum_{i=1}^n (Z_i)^2 \right]^{1/2}} \quad (5.13)$$

Dans ce présent travail, l'approche de Lye (1993) a servi pour transformer les résidus des températures maximales et minimales en distribution normale. Ces variables ont été toutefois divisées en sous-ensembles, séparant les journées pluvieuses des journées sèches. La modélisation numérique a été réalisée selon une approche d'optimisation du paramètre de transformation λ_1 qui permet de maximiser le coefficient de corrélation. Le paramètre de translation λ_2 a été estimé, pour chacun des sous-ensembles des résidus des températures, comme suit :

$$\lambda_2 = |\min(x_i)| + 0,5 \quad (5.14)$$

L'ajout de l'intervalle 0,5 à la valeur absolue de la donnée minimale de la série de résidus est hypothétique. En fait, il permet d'éliminer les divisions avec 0 (si l'intervalle est nul) et aide à une meilleure optimisation réelle du paramètre de transformation (valeur aberrante si l'intervalle est trop élevé). Les résultats générés suivent alors une courbe de distribution normale, mais non centrée à 0. Il suffit donc de leur effectuer une translation égale à la valeur négative de la moyenne. Les étapes de la transformation sont présentées à l'annexe VIII. La Figure 5.2 illustre les résultats pour les résidus de la température maximale lors de journées sèches.

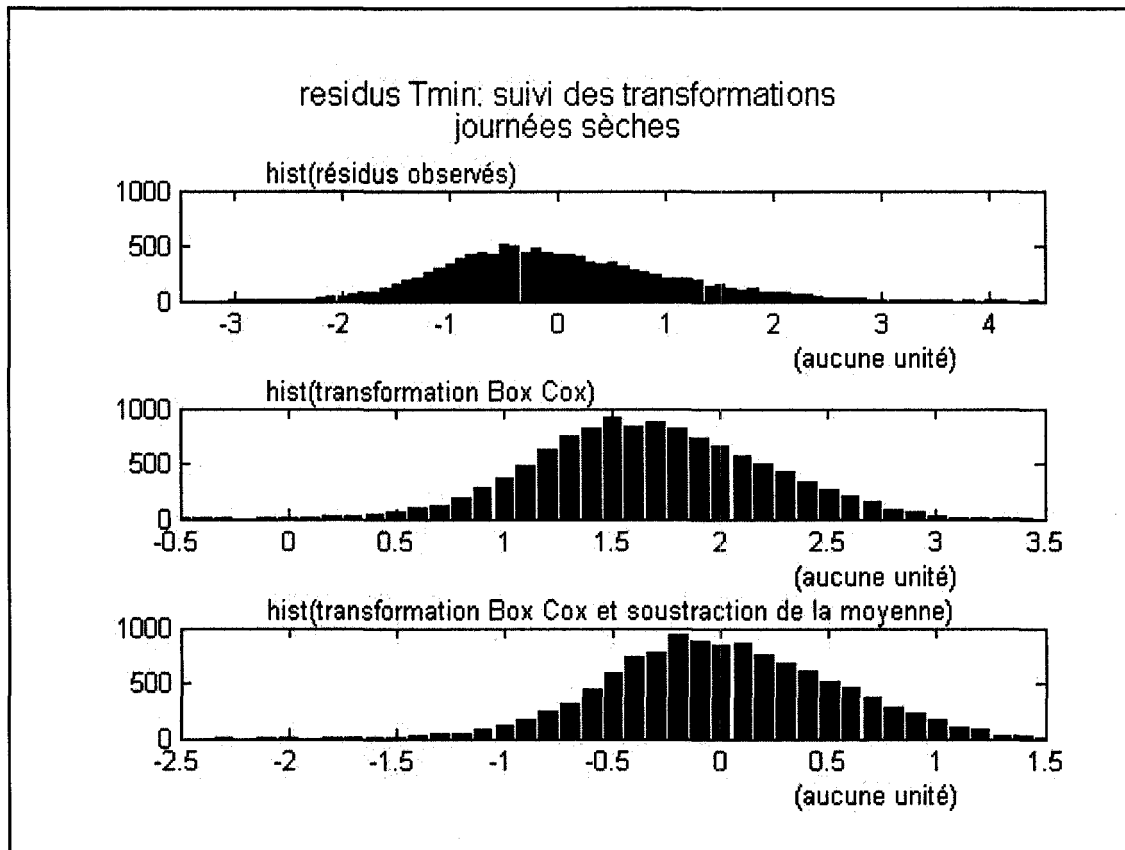


Figure 5.2 *Transformation Box-Cox des résidus des températures minimales lors de journées sèches.*

Suite à cette étape, il est maintenant possible de calculer les matrices qui définissent les coefficients de corrélation et les coefficients de corrélation croisés des variables qui sont décrits selon un modèle autorégressif linéaire de premier ordre (Matalas, 1967). Ces matrices sont présentées à la section 5.2.1.

En ce qui a trait à la simulation de séries de températures maximale et minimale, les résidus sont générés selon la formule 5.8 de la section 5.2.1, suggérée par Matalas (1967) et suivie par Richardson (1981).

Dans cette équation, $\varepsilon_{p,i}(j)$ désigne un nombre aléatoire normalement distribué dont la moyenne est zéro et la variance est 1. Des essais ont été réalisés pour évaluer si l'hypothèse que le nombre aléatoire du jour i pour la température maximale et minimale soit le même pourrait minimiser le nombre de fois où l'on retrouve $T_{\max} < T_{\min}$. Malheureusement, aucune différence ou amélioration majeure n'a été constatée lors des simulations. Une seconde approche a été développée et utilisée dans le processus de génération des températures maximales et minimales. Il s'agit de tirer un nombre aléatoire pour chacune des journées jusqu'à ce que celui-ci génère un résidu se situant à l'intérieur des limites de la distribution normale des variables transformées précédemment. Ainsi, si lors d'une journée pluvieuse le nombre aléatoire pigé pour la température minimale résulte en un résidu inférieur ou supérieur à la courbe de distribution, une autre variable aléatoire sera tirée.

5.2.4 Comparaison des générateurs de climat

Pour évaluer l'efficacité de l'approche Box-Cox dans la simulation des séries de température, il suffit de comparer le générateur de climat WeaGETS modifié à l'original (Chaîne de Markov de troisième ordre). Trente simulations de 300 ans ont été réalisées, autant pour le générateur initial que pour le générateur modifié. Les résultats générés sont présentés à l'annexe IX. À première vue, les résultats du WeaGETS/Box-Cox et du WeaGETS original semblent très similaires. Une analyse comparative approfondie doit donc être réalisée afin d'établir quelle méthode donne de meilleurs résultats.

L'analyse comparative a été effectuée grâce au test de Kolmogorov-Smirnov. Il est défini comme un test d'ajustement et d'hypothèse qui détermine si deux fonctions de répartition empiriques $P_x(x)$ et $S_n(x)$ sont issues d'une même loi.

L'hypothèse nulle H_0 indique que $P_x(x) = S_n(x)$

L'hypothèse alternative H_1 indique que $P_x(x) \neq S_n(x)$

L'idée est de calculer la distance maximale entre ces deux fonctions, correspondant ici aux données observées et simulées. La formule est établie comme suit :

$$D = \max |P_x(x) - S_n(x)| \quad (5.15)$$

où D est la distance maximale absolue entre les deux fonctions, $P_x(x)$ est la distribution cumulative théorique (données observées) et $S_n(x)$ est la distribution cumulative des données simulées.

La distance maximale est par la suite comparée à une valeur critique admissible que l'on peut retrouver dans une table statistique. Selon le tableau produit par Birnbaum (1952), une formule asymptotique est décrite dépendamment du seuil de signification voulue. Ce dernier est défini comme un risque consenti à l'avance de rejeter à tort l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie. On lui fait correspondre une région de rejet dont sa probabilité correspond à l'aire de cette région. Dans cette présente, un seuil de 0,05 a été établi. Ainsi, la valeur critique peut être calculée comme suit :

$$D_x = \frac{1,36}{\sqrt{n}} \quad (5.16)$$

où D_x est la valeur admissible et n , le nombre total de données observées dans l'échantillon. Si la distance maximale D est supérieure ou égale au seuil critique D_x , l'hypothèse de départ H_0 est rejetée.

Le test Kolmogorov-Smirnov a été évalué mensuellement sur les données de chacune des séries simulées pour le générateur de climat original et modifié. Le Tableau 5.1 résume les résultats du test pour les températures maximales et minimales. Les valeurs

indiquées sont les moyennes des distances maximales absolues D calculées pour les 30 séries simulées. Les deux colonnes « Obs » présentent les seuils critiques calculés selon l'équation 5.11. Bien que la majorité des distances D soit supérieure à la valeur admissible D_x , on remarque de meilleurs résultats pour le générateur modifié selon la transformation Box-Cox. Les cellules colorées exposent d'ailleurs ces essais optimums. On constate également une forte amélioration des résultats pour les températures minimales. En ce qui a trait aux températures maximales, les distances D sont minimisées, mais de moins grande amplitude.

Tableau 5.1

Résultats du test Kolmogorov-Smirnov pour les séries de températures simulées avec WeaGETS original et modifié

Mois	Tmax			Tmin		
	Gen_orig	Gen_modif	Obs	Gen_orig	Gen_modif	Obs
	D	D	D_x	D	D	D_x
janvier	0,0935	0,0722	0,0372	0,1239	0,0679	0,0372
février	0,0444	0,0257	0,0392	0,0972	0,0699	0,0392
mars	0,0938	0,1003	0,0372	0,1277	0,0497	0,0372
avril	0,0394	0,0504	0,0379	0,1227	0,0628	0,0379
mai	0,1369	0,1215	0,0372	0,0471	0,1020	0,0372
juin	0,0484	0,0453	0,0379	0,1545	0,0941	0,0379
juillet	0,0483	0,0586	0,0372	0,1883	0,1134	0,0372
août	0,0449	0,0423	0,0372	0,1387	0,0491	0,0372
septembre	0,0978	0,0876	0,0379	0,1910	0,1344	0,0379
octobre	0,1023	0,0959	0,0372	0,0449	0,0818	0,0372
novembre	0,0833	0,0936	0,0379	0,1450	0,0918	0,0379
décembre	0,0833	0,0481	0,0372	0,1698	0,0945	0,0372

Les tableaux 5.2 et 5.3 présentent le nombre de fois, sur une série de 30 échantillons, où l'hypothèse nulle H_0 ($D \leq D_x$) a été acceptée. Bien que les résultats des tests aient été améliorés considérablement avec la transformation de Box-Cox, ces derniers sont plus souvent rejetés que ceux calculés avec le générateur original. En effet, si l'on examine en termes de classe, moins de mois ont bénéficié d'un essai accepté. Comme autre constatation, le générateur de climat modifié simule une plus grande quantité de « $T_{\max} - T_{\min} < 0$ ». D'après le Tableau 5.4, on remarque que la fréquence de cette problématique a doublé, passant de 4 % à près de 8 %. La raison de ce phénomène peut être, entre autres, la limitation des variables aléatoires. Par ce fait, une étude rigoureuse pourrait faire l'objet d'une future recherche.

Bien que cette approche ne soit pas encore tout à fait au point pour améliorer de manière significative les résultats simulés, elle encourage néanmoins le questionnement sur les hypothèses du générateur original, soit d'affirmer que les températures maximales et minimales suivent une distribution normale et peuvent ainsi être simulées selon la méthode de Richardson (1981).

Tableau 5.2

Nombre de tests acceptés pour la température maximale

	Tmax			
	Gen_orig	Accepté	Gen_modif	Accepté
janvier	0,0935	0	0,0722	0
février	0,0444	7	0,0257	30
mars	0,0938	0	0,1003	0
avril	0,0394	9	0,0504	0
mai	0,1369	0	0,1215	0
juin	0,0484	0	0,0453	0
juillet	0,0483	2	0,0586	0
août	0,0449	1	0,0423	5
septembre	0,0978	0	0,0876	0
octobre	0,1023	0	0,0959	0
novembre	0,0833	0	0,0936	0
décembre	0,0833	0	0,0481	0

Tableau 5.3

Nombre de tests acceptés pour la température minimale

	Tmin			
	Gen_orig	Accepté	Gen_modif	Accepté
janvier	0,1239	0	0,0679	0
février	0,0972	0	0,0699	0
mars	0,1277	0	0,0497	0
avril	0,1227	0	0,0628	0
mai	0,0471	2	0,1020	0
juin	0,1545	0	0,0941	0
juillet	0,1883	0	0,1134	0
août	0,1387	0	0,0491	0
septembre	0,1910	0	0,1344	0
octobre	0,0449	4	0,0818	0
novembre	0,1450	0	0,0918	0
décembre	0,1698	0	0,0945	0

Tableau 5.4

Nombre de jours moyen où la température maximale est inférieure à la température minimale

	Gen_orig	Gen_modif
(Tmax<Tmin) moyenne en jours	4377,5	9252,4
% sur 109 500 jours	4,0 %	8,4 %

5.3 Intégration des générateurs de climat dans la modélisation hydrologique

Les séries synthétiques produites par le générateur de climat WeaGETS original et celui modifié par la transformation Box-Cox seront utilisées dans le modèle hydrologique HSAMI. Avec l'intégration des anomalies mensuelles en début de processus, ces séries permettront de comparer les résultats à ceux élaborés au chapitre 4 et ainsi d'analyser l'importance de l'application d'un générateur de climat dans la modélisation hydrologique. Les résultats de cette approche sont présentés au chapitre 6.

CHAPITRE 6

ANALYSE COMPARATIVE DES RÉSULTATS

L'utilisation d'un générateur de climat dans le processus de modélisation des changements climatiques et des impacts associés au cycle hydrologique est ici présentée. Après avoir simulé 30 séries synthétiques de 300 ans correspondant au climat horizon 2050, il est maintenant possible de les employer comme intrant dans le modèle hydrologique HSAMI. Les résultats exposés dans ce chapitre proviennent des simulations pour le bassin de Churchill Falls et sont comparés aux simulations réalisées au chapitre 4.

6.1 Comparaison des anomalies

Lors des essais précédents, l'ajout d'anomalies mensuelles aux données observées a permis d'évaluer les tendances saisonnières des apports pour les bassins à l'étude. Pour se faire, le même nombre ou ratio a été imposé à toutes les valeurs d'un mois donné, conservant ainsi la moyenne mensuelle produite par les MCG. Cette approche comporte évidemment des incertitudes puisque aucune variation journalière n'est introduite, éliminant par le fait même la génération d'événements extrêmes et ponctuels.

Comme il a été mentionné dans les chapitres antérieurs, seul le modèle HadCM3 possède des données journalières accessibles au public. Toutefois, ces dernières pourraient introduire des variabilités trop importantes dans les paramètres et une plus grande incertitude dans les résultats. En effet, cette recherche est basée sur l'élaboration d'un scénario global plausible en 2050. La précision des résultats serait obtenue par l'utilisation d'un modèle climatique plus raffiné tel qu'un modèle régional.

Le scénario HadCM3A2a mensuel a donc été ajouté dans le générateur de climat modifié afin de produire des séries synthétiques correspondant à un futur horizon 2050. La variation recherchée est plutôt créée par le générateur de climat. À titre comparatif, la Figure 6.1 illustre les deltas mensuels et journaliers du HadCM3A2a. On remarque une instabilité beaucoup plus importante en hiver pour les anomalies journalières, autant pour les précipitations que pour les températures maximales et minimales. Le taux de précipitation en été semble par contre un peu plus constant pour les deux scénarios.

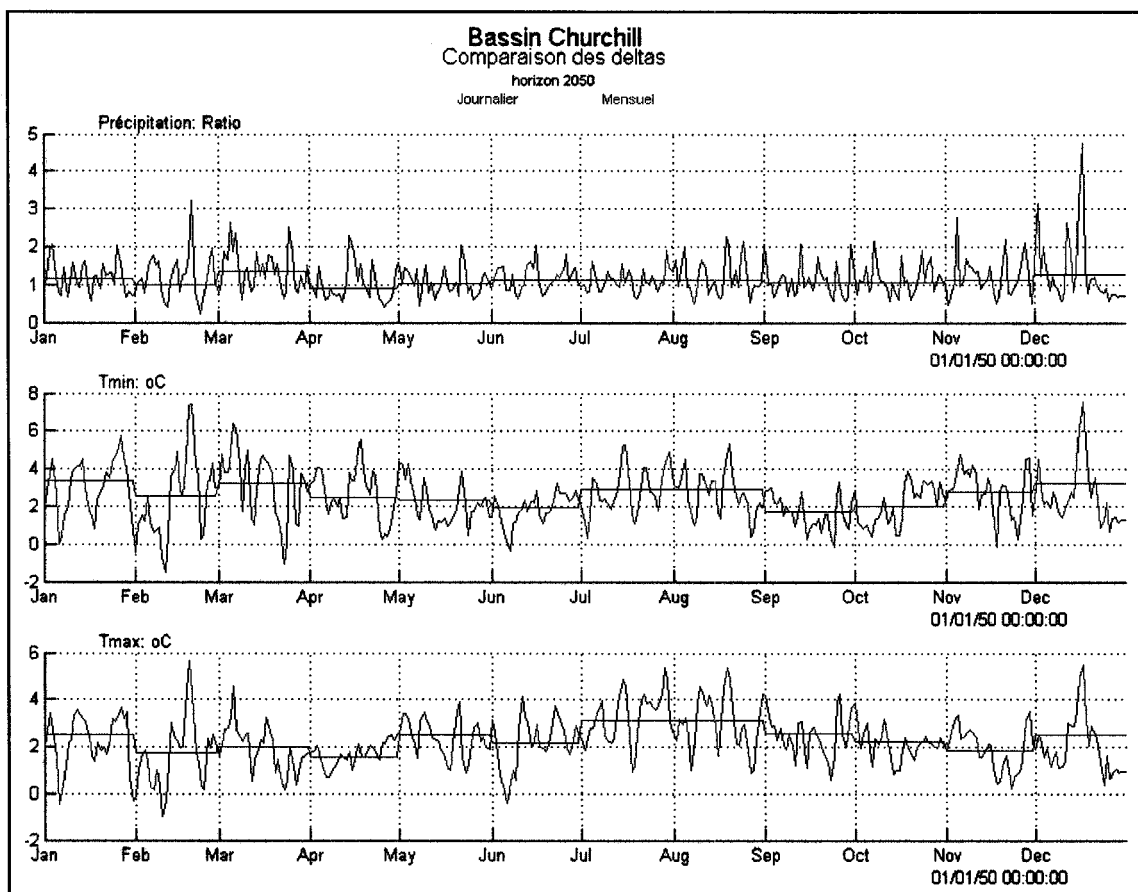


Figure 6.1 *Comparaison des deltas mensuels et journaliers pour le scénario HadCM3A2a.*

6.2 Comparaison des apports

Avant d'ajouter les anomalies mensuelles au générateur de climat, on doit d'abord s'assurer que les séries climatiques simulées des données observées produisent des débits comparables aux apports réels. L'exercice s'est premièrement réalisé à l'aide de WeaGETS original, tel que défini dans l'étude de Caron (2006). À titre d'expérience, une seule série de 300 années a été simulée par le générateur de climat.

La Figure 6.2 compare les apports reconstitués (ce qui signifie que les paramètres climatiques observés ont été incorporés dans le modèle HSAMI), les apports produits avec les séries climatiques de WeaGETS original pour 300 ans (que l'on nommera « apports simulés ») et les apports réels de 1972 à 2002. Il est à noter que ces valeurs sont la moyenne des années de données. On constate premièrement une sous-estimation des apports simulés pour la période hivernale, printanière (début) et automnale. Toutefois, l'écart considérable entre la pointe de crue simulée et reconstituée semble beaucoup plus inquiétant. Ce dernier est évalué à $1430 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour clarifier les raisons de cette différence, quelques essais et analyses ont dû être réalisés.

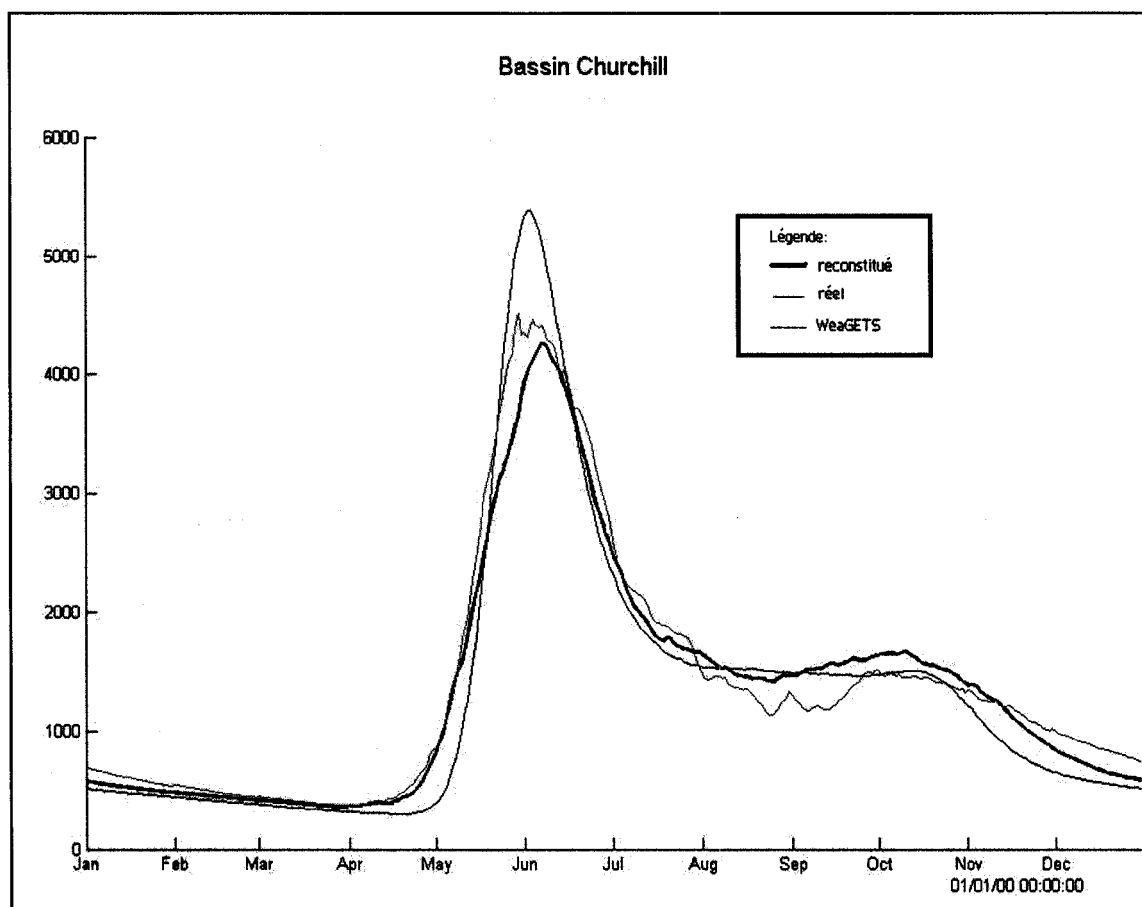


Figure 6.2 *Comparaison des hydrogrammes : apports reconstitués, apports générés avec WeaGETS original et apports réels (m³/s).*

La première analyse a été d'abord de comprendre pourquoi les apports moyens simulés en période de crue sont supérieurs à ceux reconstitués et réels. Les graphiques suivants illustrent les hydrogrammes de chacune des années simulées, reconstituées et réelles. La Figure 6.3 présente seulement 31 années de données simulées afin de mieux comparer avec les débits observés mesurés entre 1972 et 2002 (31 ans).

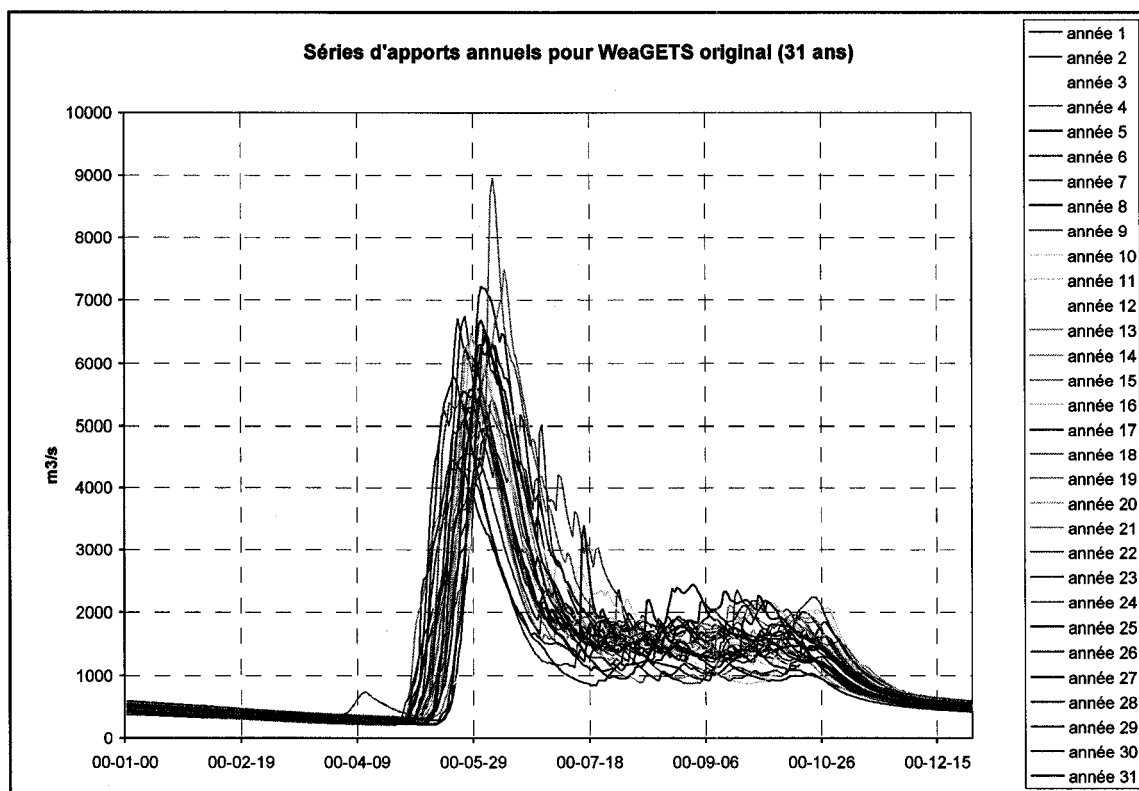


Figure 6.3 *Présentation des hydrogrammes du bassin de Churchill Falls générés avec WeaGETS original et HSAMI sur une période de 31 ans.*

On peut remarquer que les apports réels et reconstitués sont très variables d'une année à l'autre, autant en terme de quantité d'eau que de la date d'événements précis tel que la crue printanière. Ainsi, les apports d'eau importants sont répartis sur plusieurs jours, diminuant du même coup la moyenne de la crue. À titre d'exemple, le graphique des hydrogrammes reconstitués (figure 6.5) présente des apports dont les pointes de crues printanières sont réparties du 14 mai au 21 juin (38 jours). Leur valeur s'échelonne entre 3232 m³/s et 8288 m³/s, soit une fourchette de 5056 m³/s. La moyenne des crues est de 5340 m³/s avec un écart-type de 1290 m³/s. En ce qui a trait aux séries d'apports simulés, les valeurs maximales sont plus concentrées et constantes d'une année à l'autre. Ainsi, les crues printanières se situent entre le 21 mai et le 12 juin (22 jours) avec des débits maximaux se chiffrant entre 4303 m³/s et 8950 m³/s, soit un écart de 4647 m³/s. La moyenne des crues est de 5930 m³/s avec un écart-type de 975 m³/s. En raison de sa

moyenne, qui est supérieure de 590 m³/s par rapport à celle des séries reconstituées, et d'une dispersion plus faible autour de cette valeur, on peut expliquer en partie la forte crue de l'hydrogramme moyen simulé.

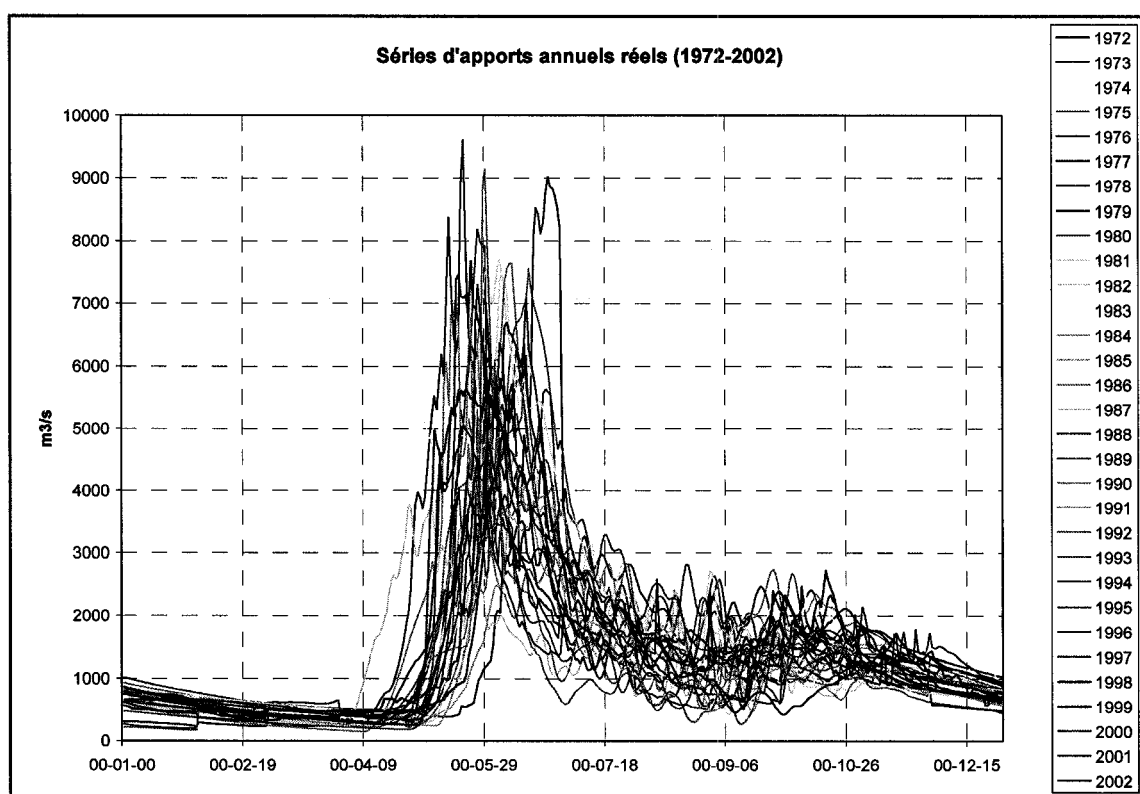


Figure 6.4 *Présentation des hydrogrammes réels pour le bassin de Churchill Falls sur la période de 1972-2002 (31 ans).*

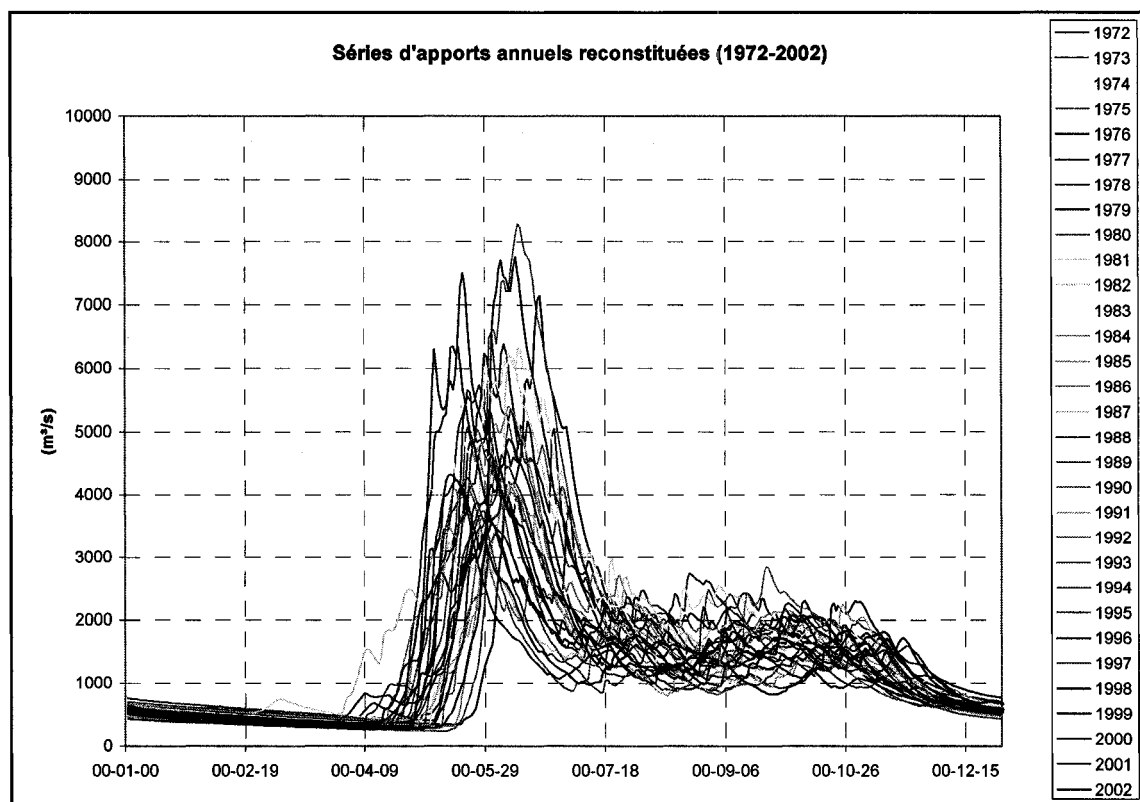


Figure 6.5 *Présentation des hydrogrammes reconstitués avec HSAMI pour le bassin de Churchill Falls sur la période de 1972-2002 (31 ans).*

La deuxième analyse consistait à rechercher la source de cette différence entre les résultats simulés et ceux reconstitués. La réponse se trouve évidemment dans les paramètres climatiques introduits dans HSAMI. Selon les graphiques précédents, une moins grande variabilité est illustrée dans les apports simulés. Celle-ci devrait être également perçue dans les paramètres climatiques produits par WeaGETS. Si l'on en croit les écarts-types présentés sur les figures 6.6 à 6.8, les températures minimales sont beaucoup plus dispersées pour les séries observées que simulées. Ce phénomène donne raison à une des hypothèses de ce mémoire, à savoir que le générateur de climat a beaucoup plus de problème à simuler correctement les températures, surtout minimales. En fait, il a du mal, pour cet élément, à introduire une variabilité représentative de la réalité. Néanmoins, les deux autres paramètres semblent mieux reproduits. Les valeurs

illustrées sont les écarts-types des données observées, des séries de 30 années et de 300 années synthétiques provenant de WeaGETS original.

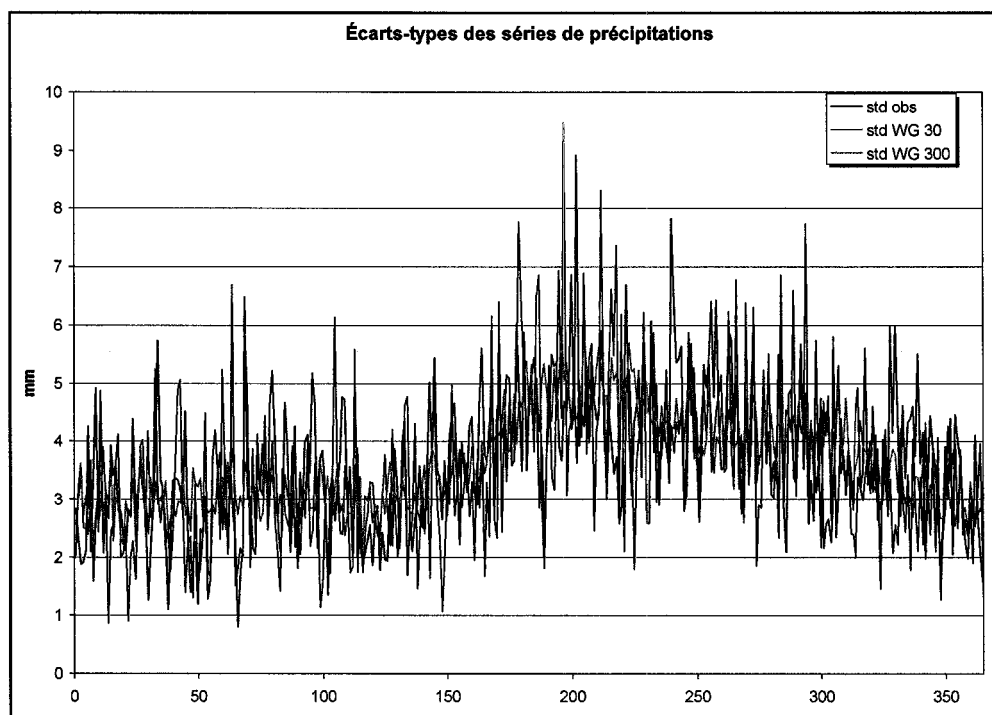


Figure 6.6 *Présentation des écarts-types des précipitations observées et simulées avec WeaGETS selon une période de 30 années et de 300 années.*

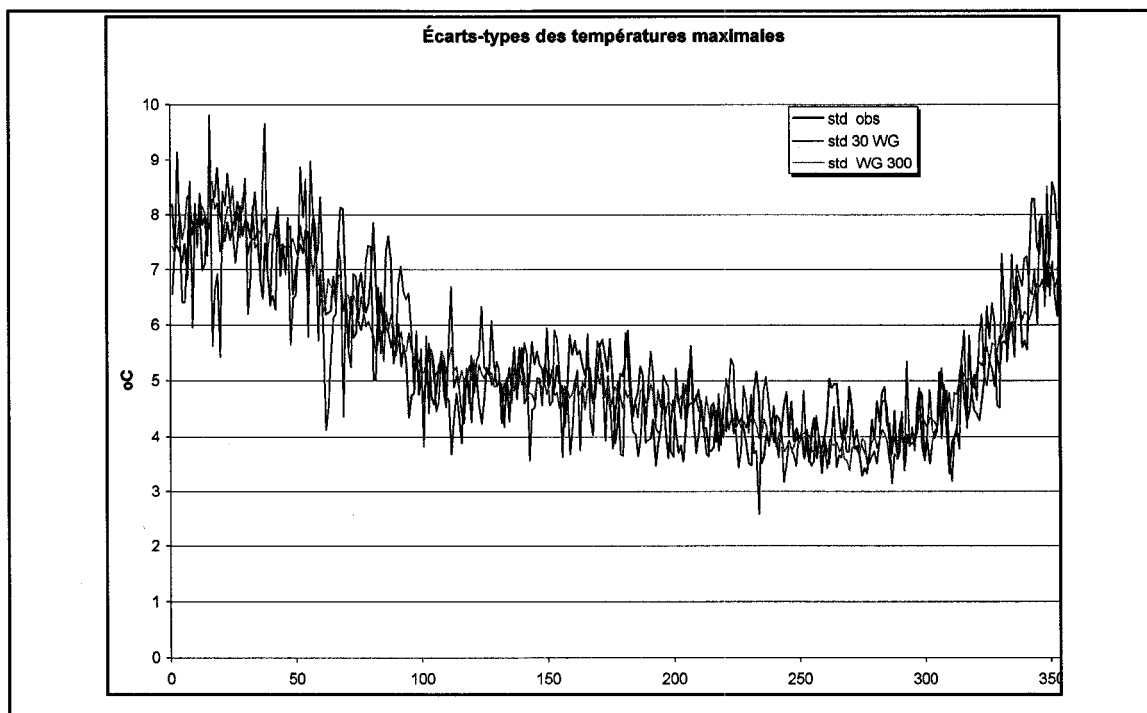


Figure 6.7 *Présentation des écart-types des températures maximales observées et simulées avec WeaGETS selon une période de 30 années et de 300 années.*

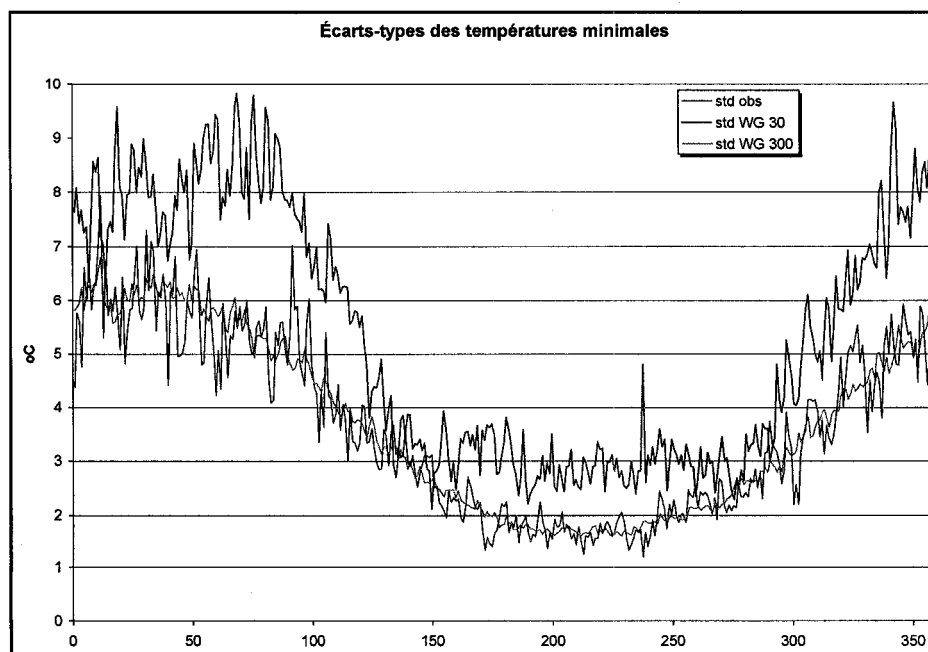


Figure 6.8 *Présentation des écart-types des températures minimales observées et simulées avec WeaGETS selon une période de 30 années et de 300 années.*

La dernière analyse permet de vérifier si l'hypothèse que les températures simulées soient à l'origine de cet écart dans les apports annuels est vraie. Pour ce faire, deux essais ont été réalisés. Le premier consistait à combiner les précipitations simulées aux données de températures maximales et minimales observées. Cette nouvelle série de paramètres a par la suite été introduite dans HSAMI pour générer des apports. La Figure 6.9 présente les résultats de cet essai.

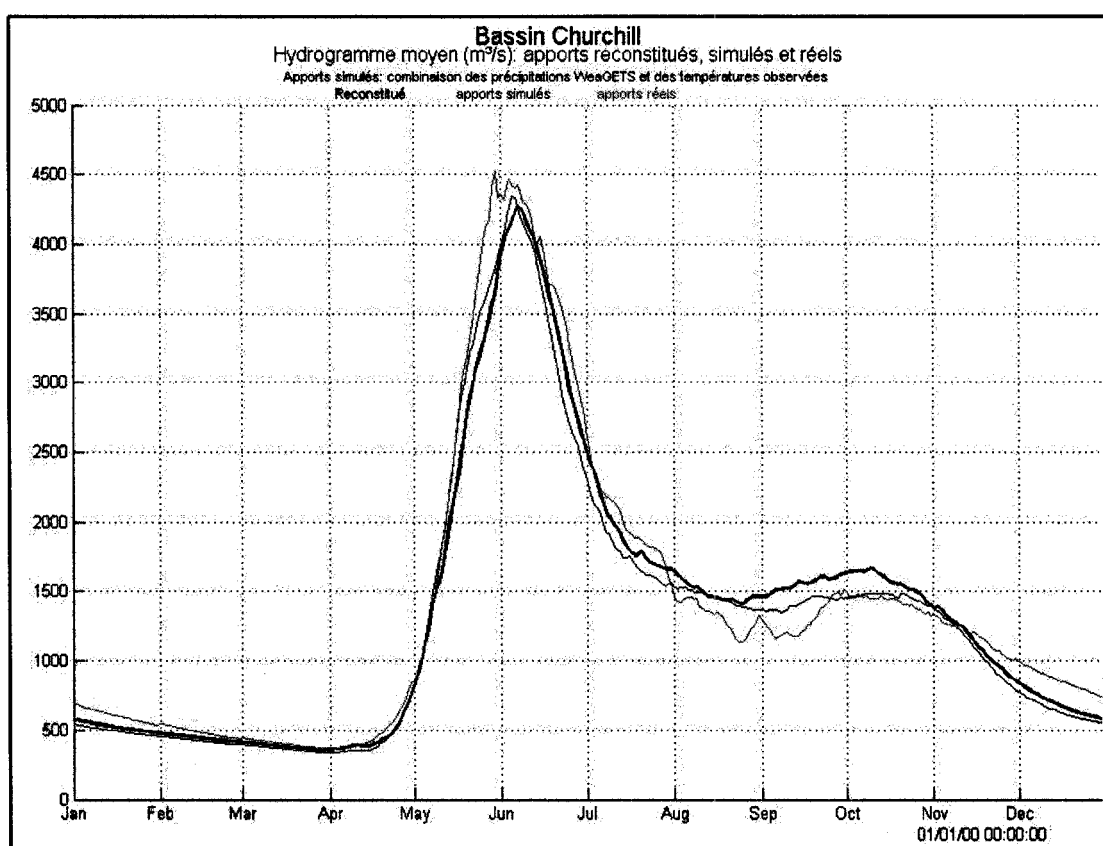


Figure 6.9 *Comparaison des hydrogrammes moyens pour les apports reconstitués, simulés (précipitation simulée et températures observées) et réels (m³/s).*

On peut observer que la nouvelle série donne des débits moyens très représentatifs de ceux reconstitués. Ainsi, on peut affirmer que les précipitations sont bien reproduites avec le générateur de climat. Toutefois, des tests additionnels devraient être réalisés en considérant, par exemple, les extrêmes. Le deuxième essai a été de combiner cette fois

les précipitations observées avec les températures simulées par WeaGETS. La Figure 6.10 illustre les apports engendrés par cette série hybride. On peut remarquer l'écart considérable entre la crue simulée et celle des deux autres courbes. On peut donc conclure que la difficulté du générateur WeaGETS à simuler correctement les températures est en partie la cause de cette anomalie dans les apports. En fait, il est incapable de simuler la variabilité interannuelle. Il ne reste plus qu'à vérifier si le générateur modifié avec Box-Cox peut éliminer, ou du moins, diminuer cette différence.

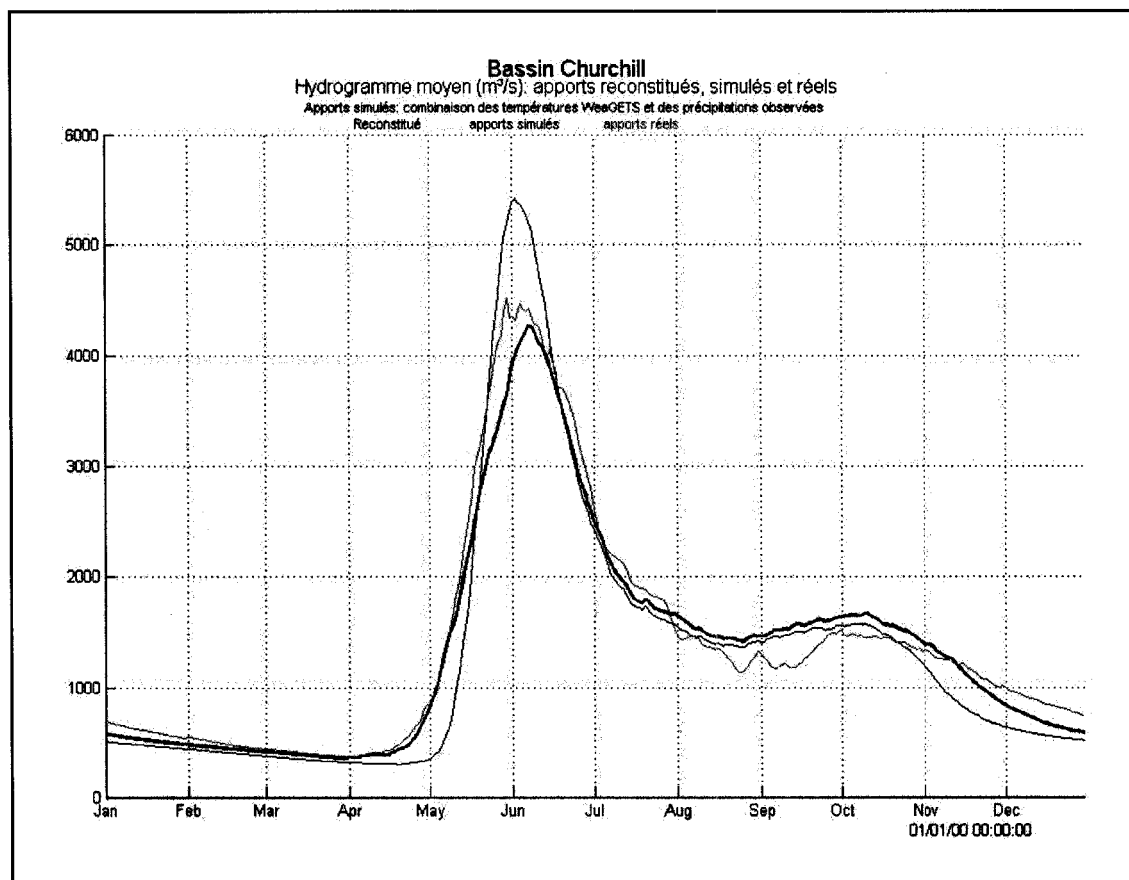


Figure 6.10 *Comparaison des hydrogrammes moyens pour les apports reconstitués, simulés (précipitation observée et températures simulées) et réels*

Tel que mentionné au paragraphe précédent, la prochaine étape consiste à simuler une série expérimentale de 300 ans basée sur le WeaGETS modifié avec Box-Cox. Ce

processus permet de vérifier de façon indirecte si l'application du théorème de Box-Cox améliorera la représentativité des résultats pour les températures. Après l'emploi du modèle hydrologique HSAMI, on remarque encore une fois un écart considérable entre les apports WeaGETS/Box-Cox et ceux reconstitués. Cette différence est surtout illustrée lors de la crue printanière et se chiffre à $1076 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $354 \text{ m}^3/\text{s}$ de moins que l'écart rencontré avec WeaGETS original (voir Figure 6.2). En observant chaque série simulée, on constate que les événements printaniers surviennent entre le 19 mai et le 13 juin, dates similaires aux séries générées avec WeaGETS original. Ensuite, les débits maximaux s'étendent entre $3911 \text{ m}^3/\text{s}$ et $9086 \text{ m}^3/\text{s}$, soit d'une fourchette de $5175 \text{ m}^3/\text{s}$. Cet écart s'apparente davantage à celui rencontré pour les données reconstituées, soit de $5056 \text{ m}^3/\text{s}$. Puis, la moyenne des crues est chiffrée à $5973 \text{ m}^3/\text{s}$, valeur représentative de celle calculée pour les apports simulés avec WeaGETS original ($5930 \text{ m}^3/\text{s}$). Enfin, l'écart-type des crues est évaluée à $1227 \text{ m}^3/\text{s}$, respectant la dispersion des données reconstituées ($1290 \text{ m}^3/\text{s}$). Ainsi, en résumé, le modèle WeaGETS modifié avec Box-Cox semble améliorer certaines mesures statistiques telles que la dispersion des valeurs de débits, par rapport au modèle WeaGETS initial. La Figure 6.11 présente ces résultats.

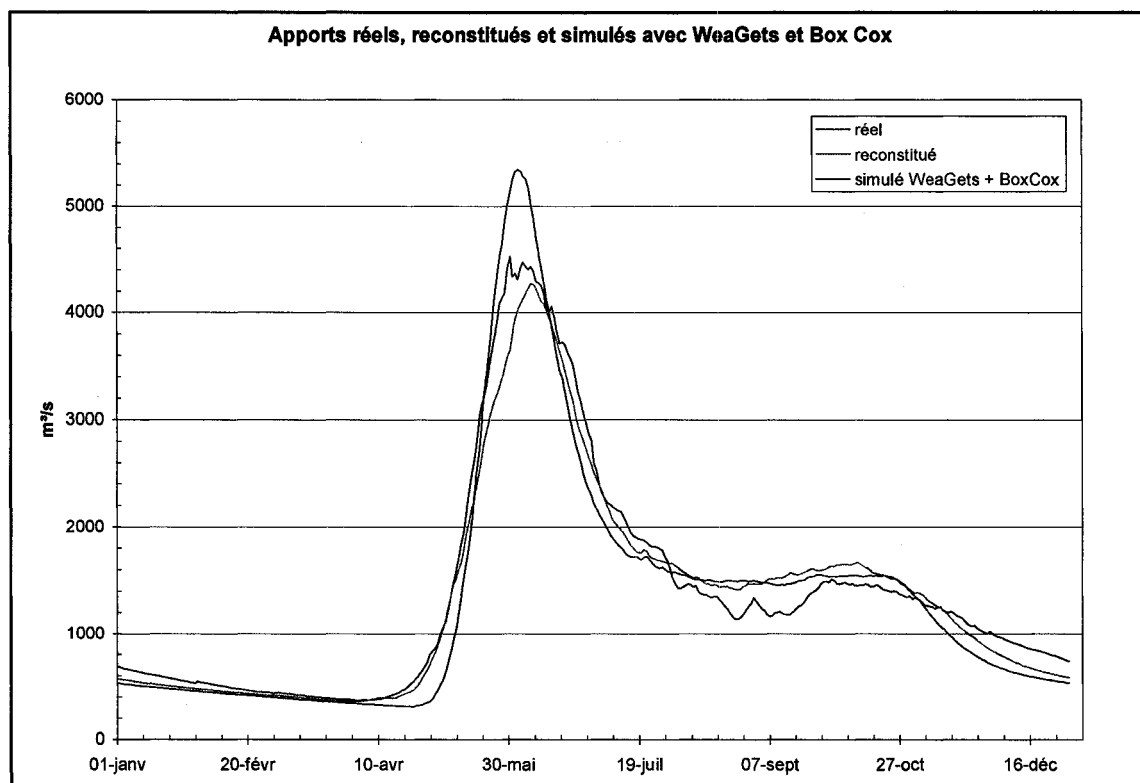


Figure 6.11 *Comparaison des hydrogrammes : apports reconstitués, apports générés avec WeaGETS/Box-Cox et apports réels (m³/s).*

Les séries synthétiques futures produites par le générateur de climat modifié avec Box-Cox ont permis d'engendrer un nombre important d'apports sur une longue période. La moyenne des 300 années, puis la moyenne des trente séries ont servi à établir une courbe comparative de 365 jours. La Figure 6.12 présente les résultats des apports reconstitués, des apports générés au chapitre 4 avec les deltas mensuels de HadCM3a et ceux engendrés avec l'intégration des deltas mensuels de HadCM3a dans le modèle WeaGETS/Box-Cox. Pour ces derniers, l'ajout des deltas mensuels s'est réalisé au tout début du processus. Ainsi la nouvelle série de données représentant l'horizon 2050 a servi d'intrant dans le générateur de climat pour reproduire les séries synthétiques.

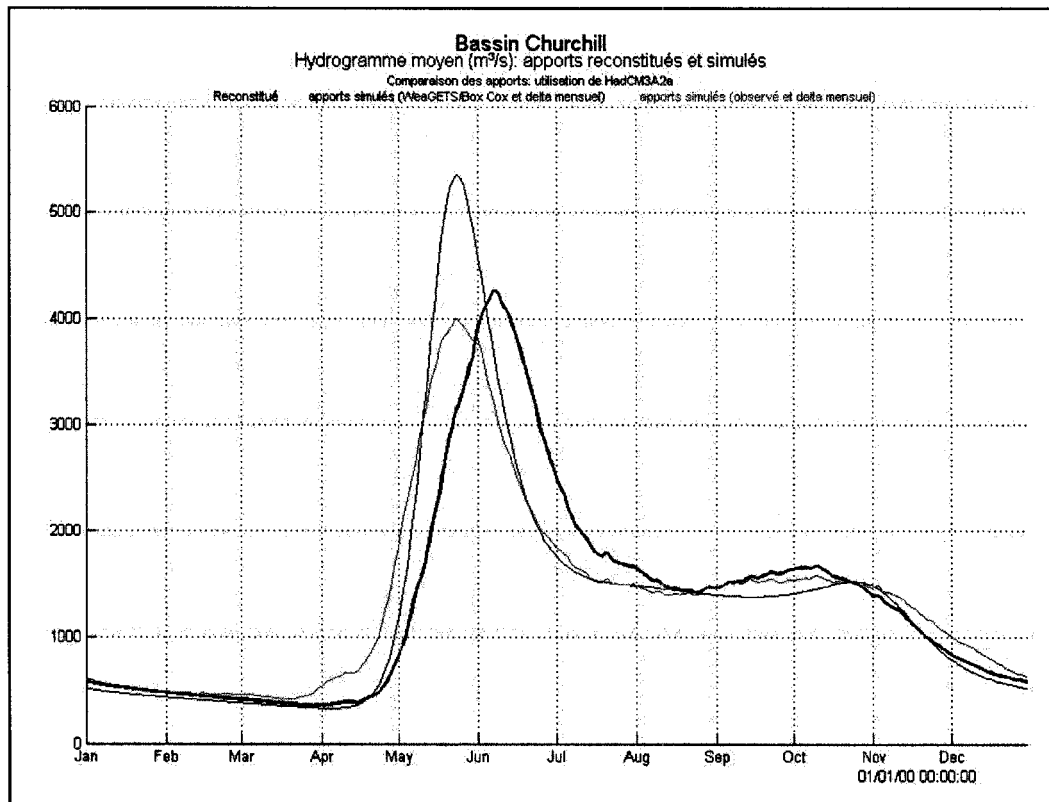


Figure 6.12 *Comparaison des hydrogrammes horizon 2050 : apports reconstitués, apports générés avec WeaGETS/Box-Cox/HadCM3a et apports reconstitués/HadCM3a (m^3/s)*

En observant la Figure 6.12, on remarque encore une fois la différence importante entre la crue simulée avec le générateur de climat et celle des apports reconstitués. Cette dernière, comme il a été expliqué dans le chapitre 4, se manifeste précocement, soit le 25 mai au lieu du 8 juin (environ deux semaines à l'avance). De plus, le débit maximal a diminué de $265 m^3/s$. En ce qui a trait à l'hydrogramme simulé, il respecte la précocité du phénomène de la crue printanière. Toutefois, la valeur du débit n'a pas diminuée; elle reste similaire au résultat généré sans delta mensuel (environ $5350 m^3/s$). Les autres périodes de l'année, quant à elles, sont beaucoup plus représentatives des résultats obtenus avec les séries reconstituées futures.

Comme il a été mentionné précédemment, l'écart considérable entre la crue printanière simulée et reconstituée pour l'horizon 2050 est causé en partie par la reproduction

inadéquate des températures minimales dans le modèle WeaGETS/Box-Cox. Encore une fois, l'analyse séparée des variables climatiques est ici présentée afin d'évaluer leur impact sur les résultats hydriques. La Figure 6.13 illustre les débits moyens générés lorsque les températures observées avec l'ajout des deltas mensuels sont combinées aux séries synthétiques des précipitations horizon 2050. Les résultats démontrent que les précipitations simulées ont moins d'influence sur la grandeur de la crue printanière. Un écart est certes remarqué entre les pointes des deux hydrogrammes, mais moindre que celui illustré à la Figure 6.12. Cet écart montre que WeaGETS/Box-Cox produit plus de ruissellement que l'approche des deltas. La hausse de la précipitation est le résultat de l'augmentation de sa variabilité (plus d'extrêmes simulés). On peut toutefois observer une diminution de la pointe de crue de l'hydrogramme moyen, passant de 5341 m³/s pour l'hydrogramme WeaGETS/Box-Cox « présent » (voir Figure 6.11) à 4500 m³/s (WeaGETS/Box-Cox « futur »).

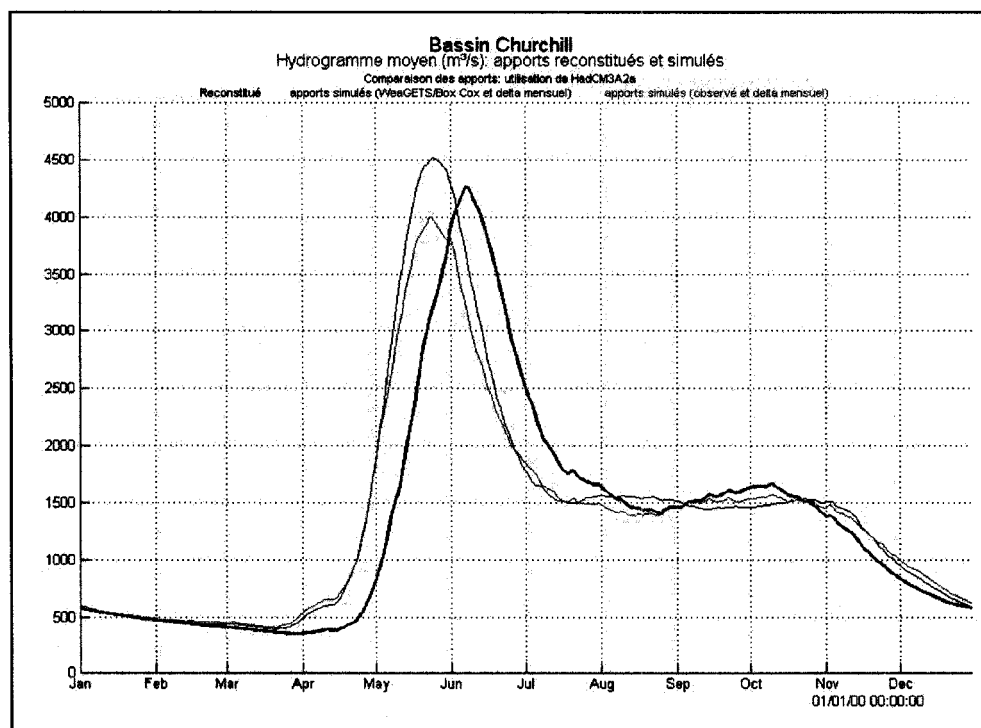


Figure 6.13 *Comparaison des hydrogrammes moyens pour les apports reconstitués, simulés horizon 2050 avec WeaGETS/Box-Cox (précipitation simulée et températures observées) et reconstitués horizon 2050.*

La Figure 6.14 présente encore une fois l'impact des séries de températures synthétiques sur la représentativité de la crue printanière. Cette fois-ci, les données de températures simulées horizon 2050 ont été combinées aux données composées des précipitations observées et des deltas mensuels de HadCM3a. On constate évidemment la différence considérable entre la crue simulée et celle reconstituée horizon 2050. On peut donc conclure à une faiblesse du générateur de climat à bien reproduire les températures. On peut également statuer que l'application de Box-Cox n'améliore pas efficacement ces résultats.

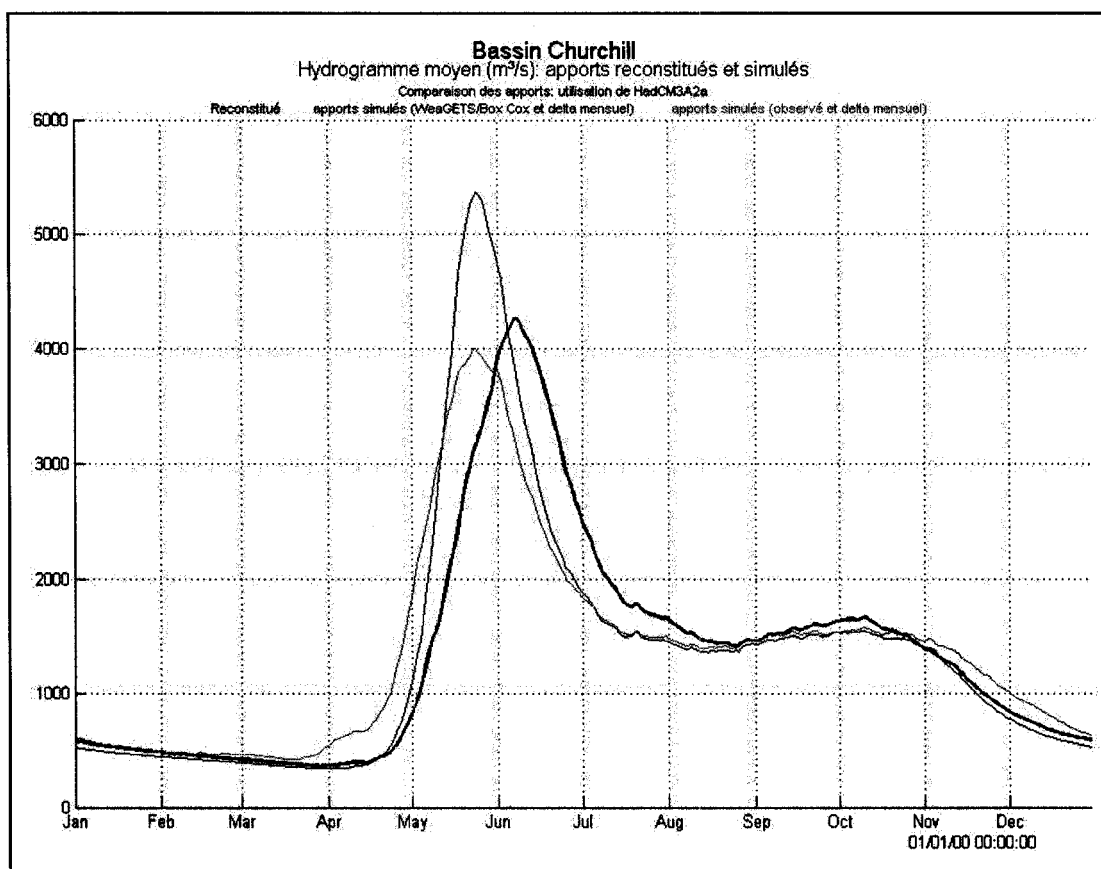


Figure 6.14 *Comparaison des hydrogrammes moyens pour les apports reconstitués, simulés horizon 2050 avec WeaGETS/Box-Cox (précipitations observées et températures simulées) et reconstitués horizon 2050.*

Le dernier graphique compare les résultats simulés horizon 2050 du générateur WeaGETS original et du WeaGETS/Box-Cox. Bien que les deux courbes soient très similaires, on constate un faible écart entre les crues printanières. L'hydrogramme du générateur de climat original présente une pointe de 5519 m³/s tandis que celle du WeaGETS/Box-Cox est de 5341 m³/s. Les autres apports durant l'année sont également mieux représentés par le générateur de climat combiné au théorème de Box-Cox.

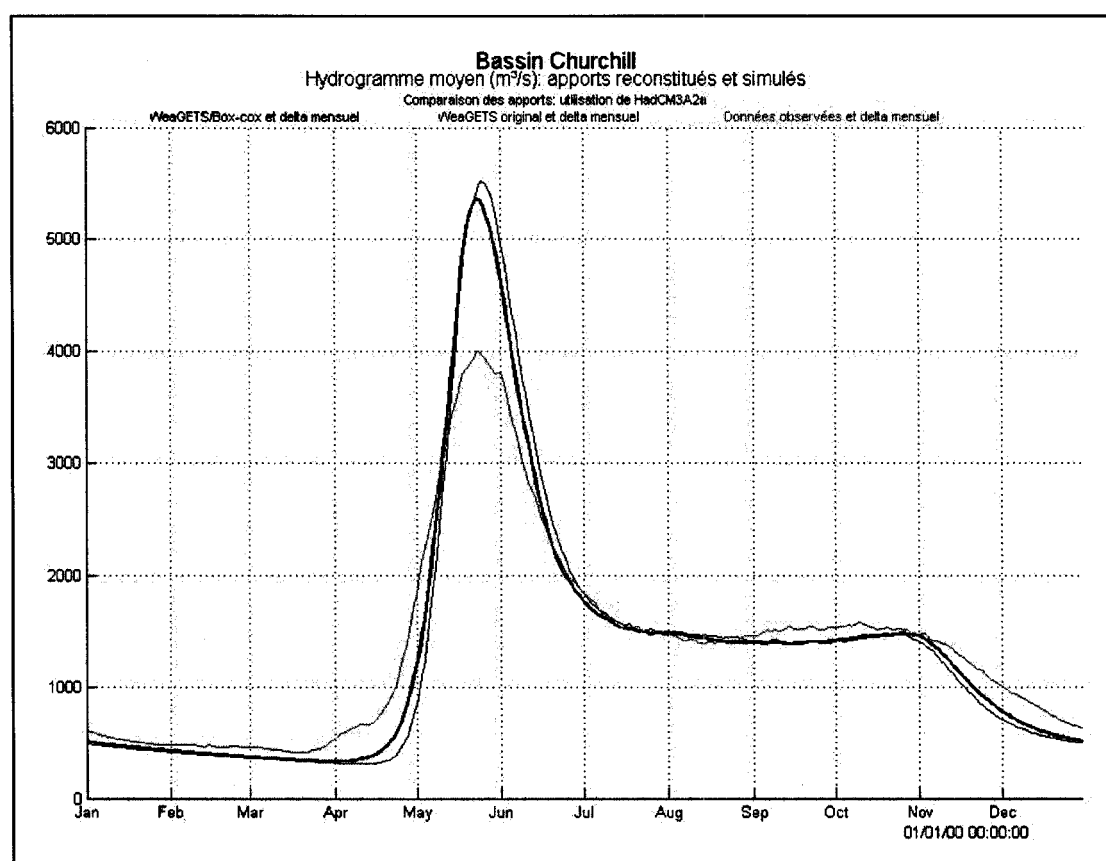


Figure 6.15 *Comparaison des hydrogrammes moyens pour les apports simulés horizon 2050 avec WeaGETS/Box-Cox, simulés horizon 2050 avec WeaGETS original, et reconstitués horizon 2050.*

En résumé, le générateur de climat WeaGETS présente à la base un problème de reproduction des séries de températures, possiblement en ce qui a trait aux températures minimales. La variabilité de ces variables n'est point respectée et influence grandement

l'envergure de la pointe annuelle des apports. Bien qu'au début de ce projet le théorème de Box-Cox semblait apte à améliorer considérablement les résultats de température, on ne constate qu'un faible progrès en ce sens.

CONCLUSION

Cette présente étude comprenait trois principaux objectifs. Tout d'abord, analyser la projection future potentielle des apports de trois réservoirs destinés à la production d'énergie hydroélectrique par l'ajout de deltas mensuels provenant de MCG. Puis, améliorer le processus de simulation des températures maximales et minimales d'un générateur de climat expérimental par l'application de la transformation de Box-Cox. Enfin, comparer la simulation des apports par la méthode des deltas mensuels et par l'intégration des anomalies mensuelles dans le générateur de climat.

En ce qui a trait à la première étape du projet, soit d'analyser les apports futurs des bassins pour l'horizon 2050, les résultats obtenus permettent de conclure que la majorité des scénarios des modèles climatiques génèrent des résultats de même tendance. Les variations saisonnières démontrent d'abord une précocité de la crue printanière dont le débit maximal est inférieur à celui observé. De plus, la période d'étiage semble être plus longue et aride. Enfin, l'hiver bénéficie d'une quantité d'eau plus importante que la période reconstituée. L'évapotranspiration potentielle est plus importante, à l'exception d'un scénario de ECHAM4 qui prédit un phénomène inverse.

La seconde phase de la recherche s'est concentrée sur l'amélioration d'un générateur de climat expérimental WeaGETS créé à l'ÉTS. En effet, l'une des hypothèses de ce modèle est que les températures maximales et minimales suivent une distribution normale, ce qui s'avère faux en partie. L'intégration d'une transformation de Box-Cox pour reproduire ces variables a permis de raffiner leurs séries synthétiques. Un test de Kolmogorov-Smirnov a servi d'outil de comparaison entre le générateur original et celui transformé par l'approche Box-Cox. Selon les résultats, le modèle modifié améliore la reproduction de la distribution des séries synthétiques, surtout en ce qui concerne les températures minimales. Toutefois, cette technique amplifie l'occurrence de simuler une température maximale inférieure à la température minimale.

La dernière partie des travaux de recherche s'est concentrée sur l'analyse de la reproduction des apports produits par l'emploi du générateur de climat original et celui modifié avec Box-Cox. Divers essais ont permis de conclure que les hydrogrammes synthétiques moyens démontrent un débit de pointe beaucoup plus important lors de la crue printanière, en comparaison avec l'hydrogramme reconstitué. Cette différence est en partie causée par une moins grande dispersion des apports annuels synthétiques, résultant ainsi d'une moyenne des valeurs plus importante que la réalité. La source première de cet écart statistique est possiblement reliée à la température minimale qui est moins bien reproduite par le générateur de climat. En effet, d'après les analyses effectuées, la dispersion de cette variable climatique est simulée inefficacement par le modèle WeaGETS. Toutefois, le générateur combiné avec la théorie de Box-Cox semble améliorer quelque peu les résultats. D'autres essais ont été réalisés pour étudier l'impact de l'utilisation du générateur de climat dans le processus de simulation de séries d'apports représentant l'horizon 2050. Les hydrogrammes résultant de cette expérience ont été comparés aux apports engendrés par la combinaison des données observées avec les deltas mensuels du modèle HadCM3a. Encore une fois, les débits de pointe prévus pour la crue printanière excèdent considérablement ceux présentés avec l'hydrogramme reconstitué horizon 2050. La date d'occurrence de l'événement est toutefois bien représentée.

Par ces essais, on a remarqué que le générateur de climat possède quelques lacunes dans la reproduction des variables climatiques, surtout en ce qui concerne les températures minimales. Bien que la théorie de Box-Cox semble être un atout majeur dans l'amélioration de ce processus, les résultats escomptés n'ont pu être atteints dans ce projet. Un mince progrès est néanmoins produit par ce générateur de climat modifié, particulièrement dans l'étendue des données de températures minimales.

RECOMMANDATIONS

Pour donner suite aux résultats de cette recherche, quelques aspects devraient être approfondis. Ils consistent entre autres à perfectionner davantage la génération des températures maximales et minimales par l'intégration de la transformation Box Cox. Les résultats sont meilleurs, mais ne permettent pas encore une reproduction adéquate. En effet, bien que le test de Kolmogorov-Smirnov ait permis de conclure à une représentativité supérieure des variables, la plupart des résultats de ce test a quand même échoué. De plus, une attention particulière serait de mise sur les nombres aléatoires intégrés dans l'équation de génération des séries résiduelles (équation 5.8). En effet, ce processus de simulation a une influence importante sur la présence de température maximale inférieure à la température minimale. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour améliorer la capacité du générateur à simuler la variabilité interannuelle.

En ce qui a trait à l'utilisation des résultats des scénarios de MCG, il serait essentiel d'élaborer une procédure permettant d'ajouter les anomalies mensuelles aux données observées, mais sans intégrer toujours le même nombre. Il suffirait d'incorporer une variation journalière qui conserverait une moyenne mensuelle identique aux résultats des scénarios. L'application des deltas journaliers semblerait plus efficace, mais au contraire, produirait des variations non représentatives de la réalité. En effet, ces séries climatiques générées par des modèles globaux sont controversées quant à leur vraisemblance.

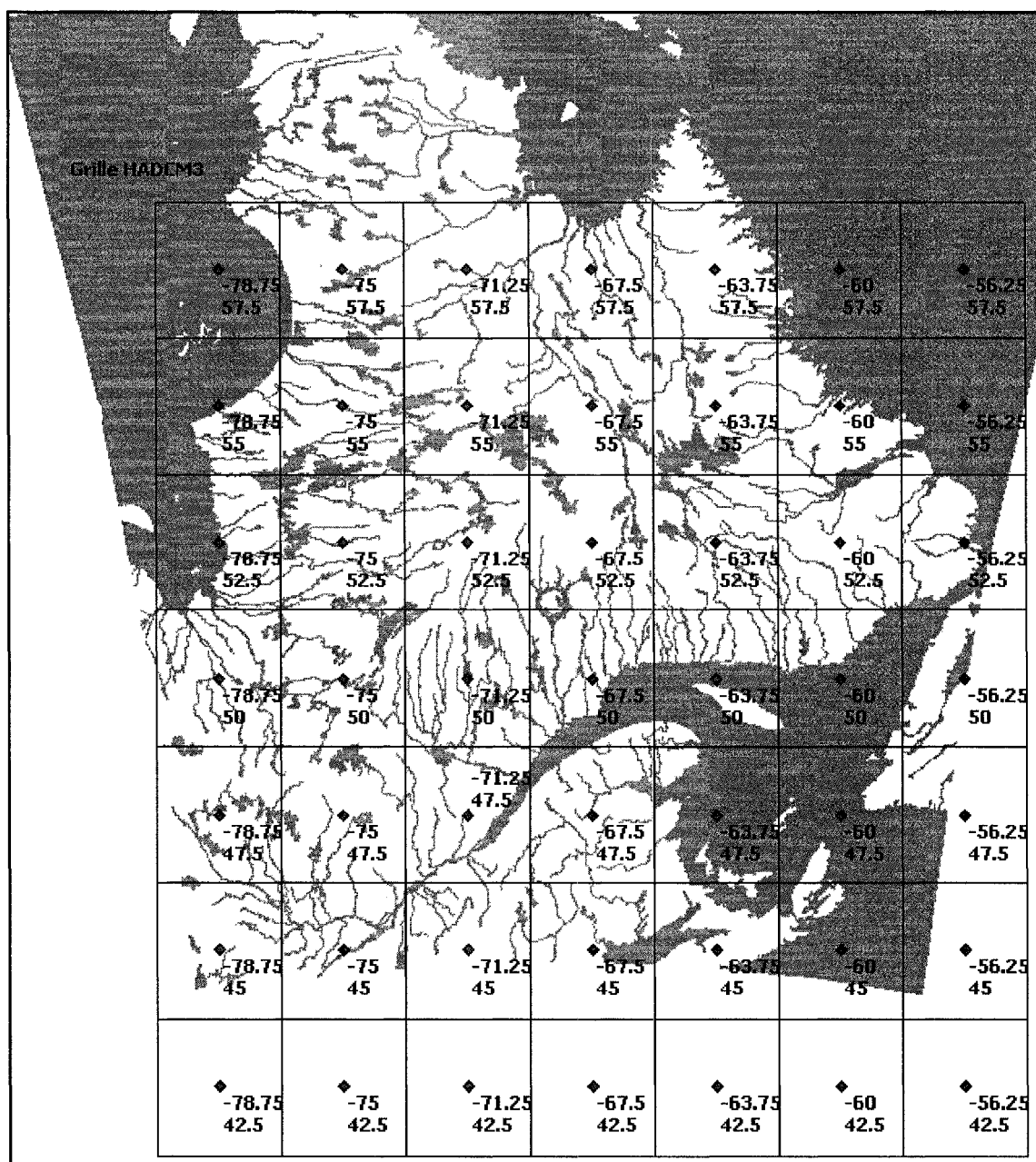
En observant les résultats du chapitre 6, on remarque clairement la difficulté du générateur de climat à produire une variabilité interannuelle permettant d'obtenir des apports moyens similaires aux données observées, surtout en ce qui concerne la crue printanière. Cette situation suggère le besoin d'améliorer le processus de simulation des températures minimales pour WeaGETS. Bien que la théorie de Box-Cox semble être

une idée ingénieuse pour améliorer les résultats, l'application d'autres principes statistiques serait à considérer.

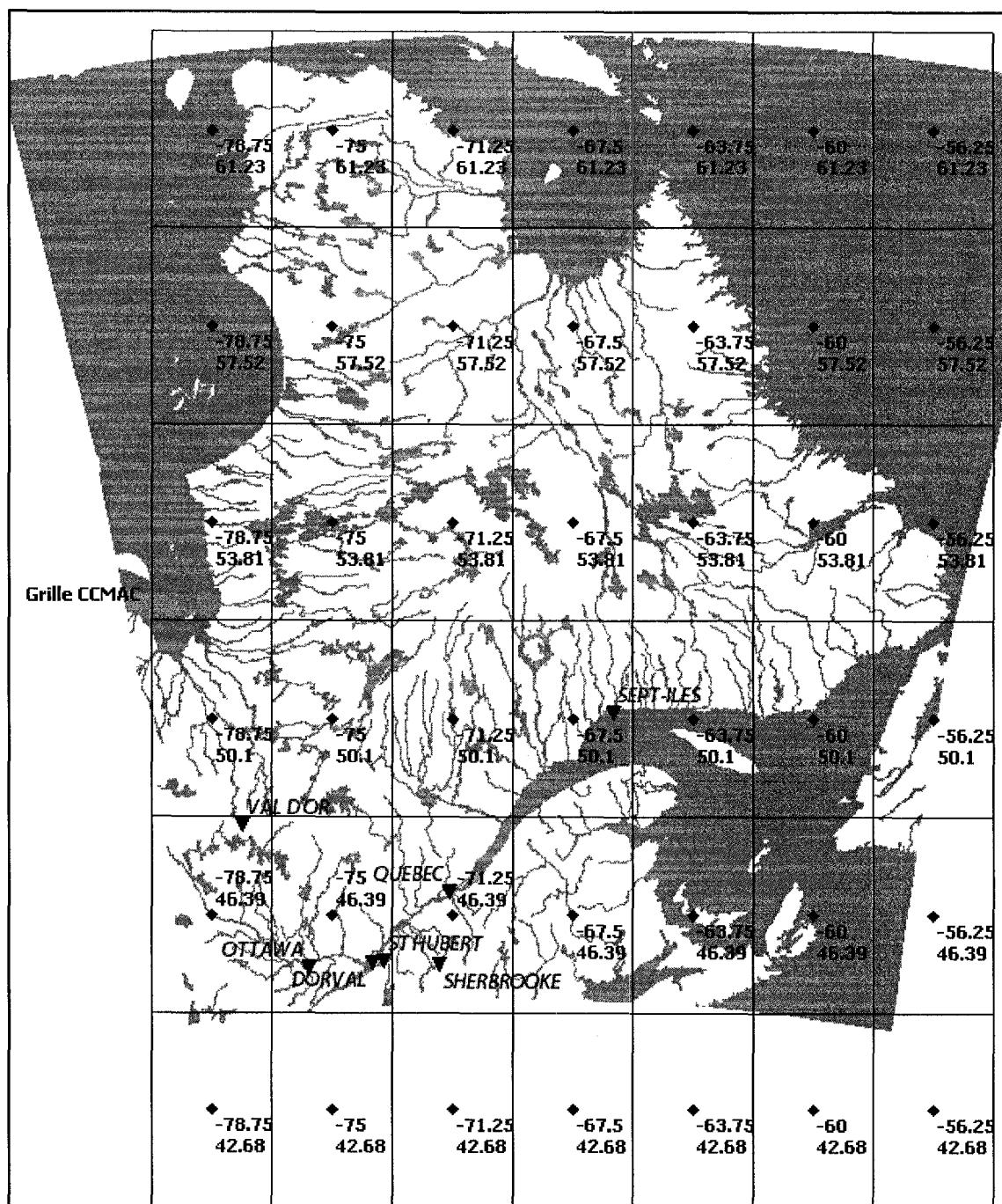
Enfin, cet exercice devrait être réalisé sur un autre type de modèle hydrologique. En effet, bien que HSAMI soit un outil fiable et utilisé fréquemment, il serait bon de reprendre ce processus, mais pour un modèle différent.

ANNEXE I

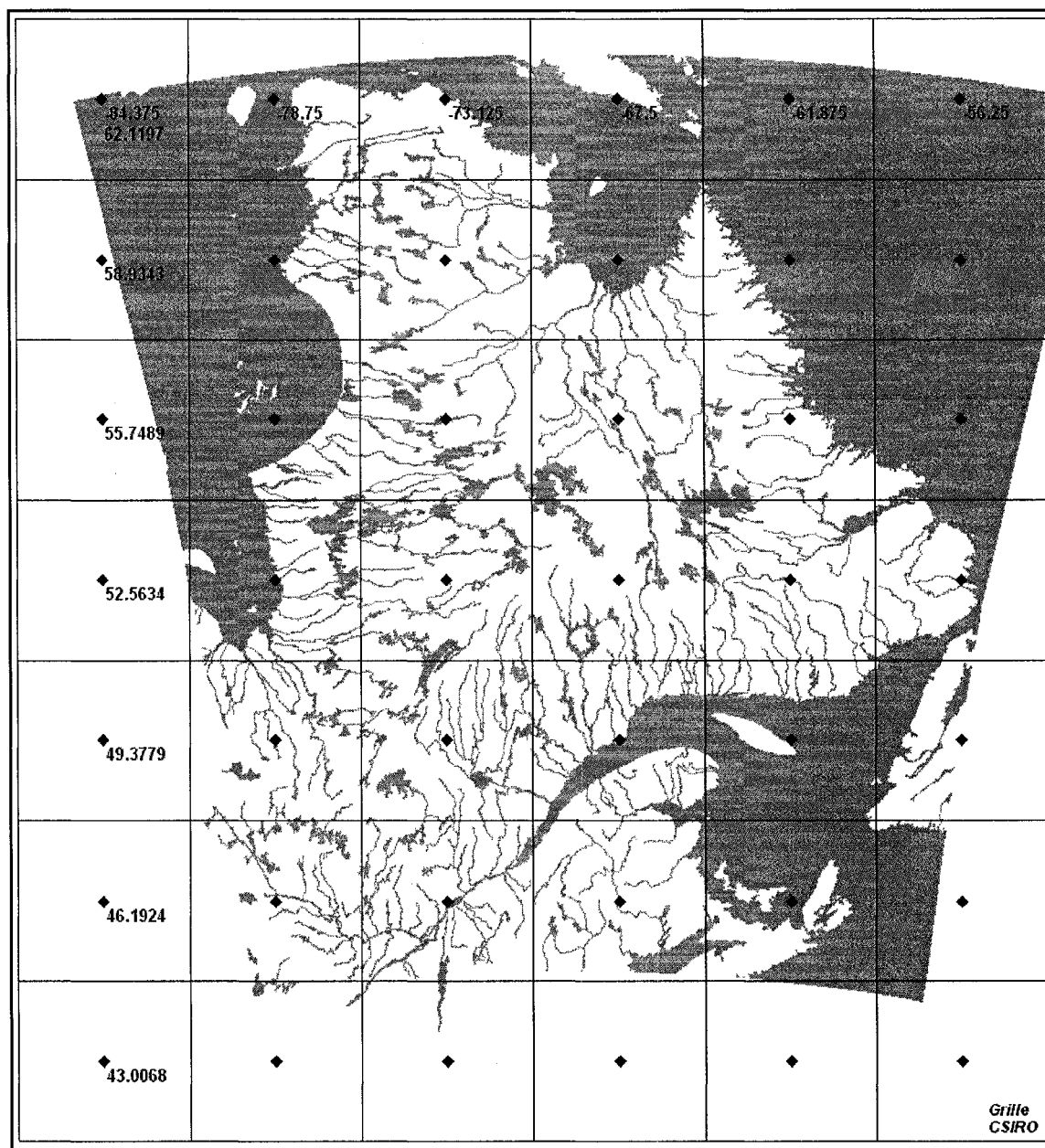
MAILLAGE DES MODÈLES CLIMATIQUES SUR LA PROVINCE DE QUÉBEC



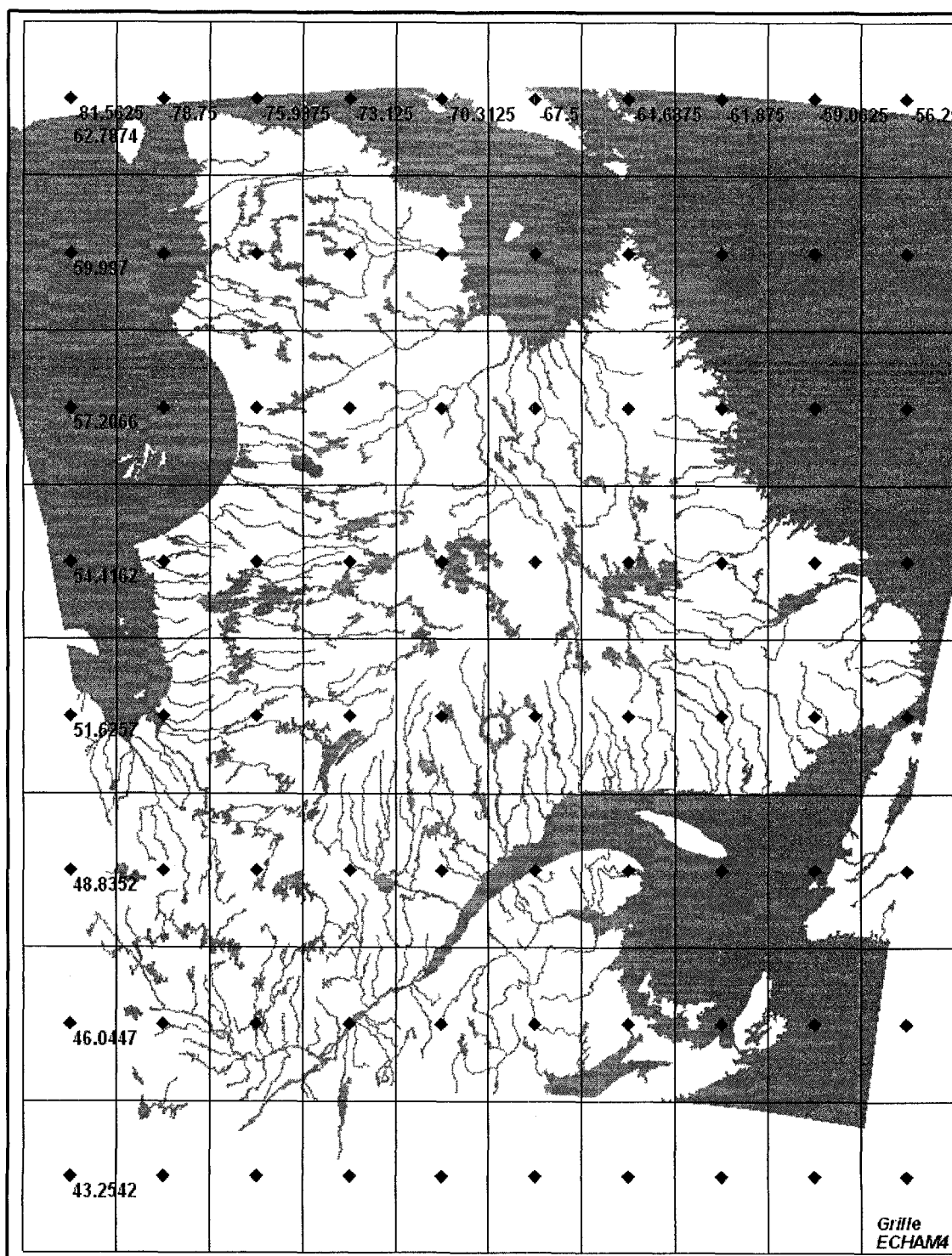
Annexe I-1 Grille du modèle HadCM3 pour le Québec



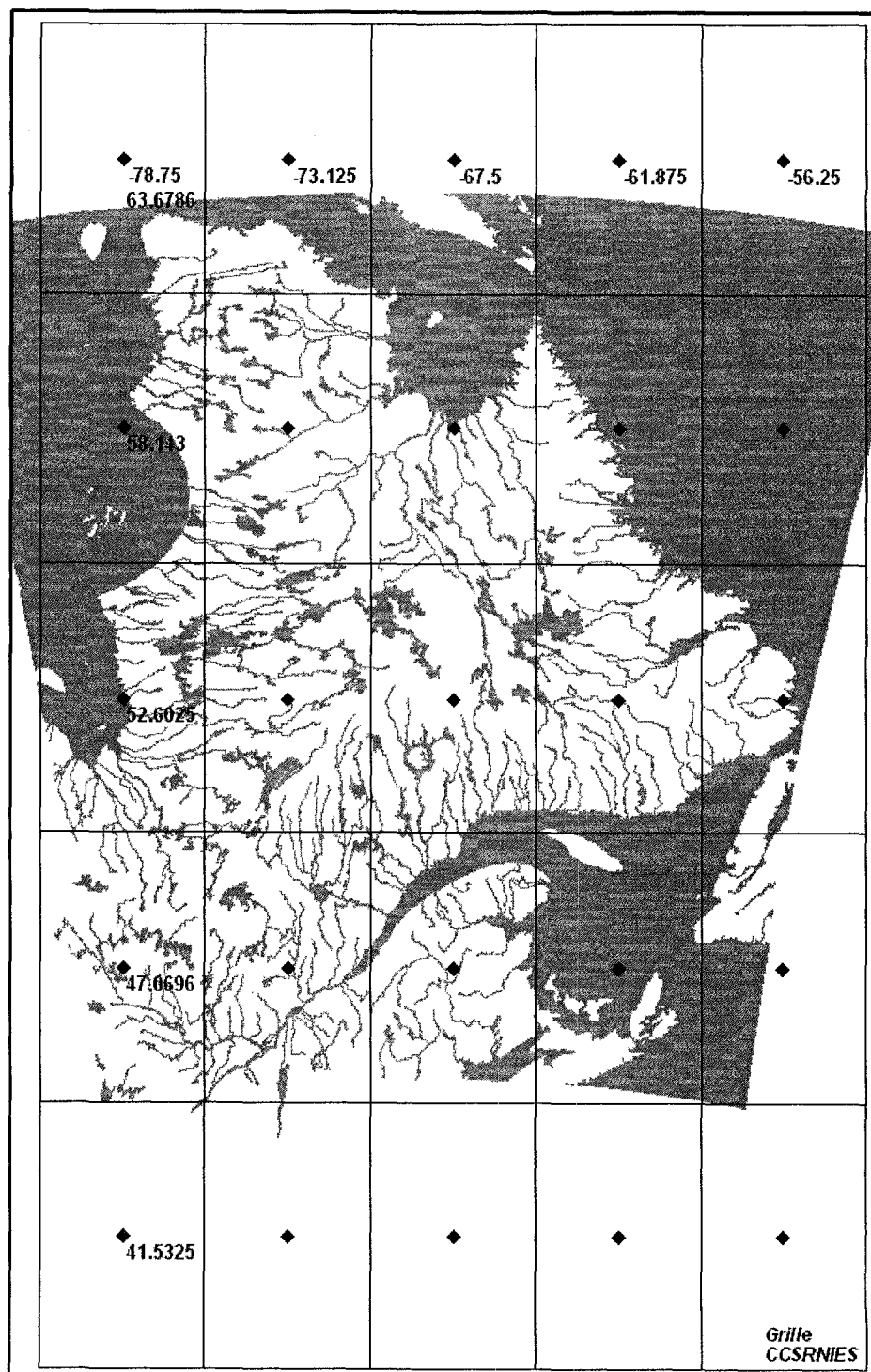
Annexe I-2 Grille du modèle CCMAC pour le Québec



Annexe I-3 Grille du modèle CSIRO pour le Québec



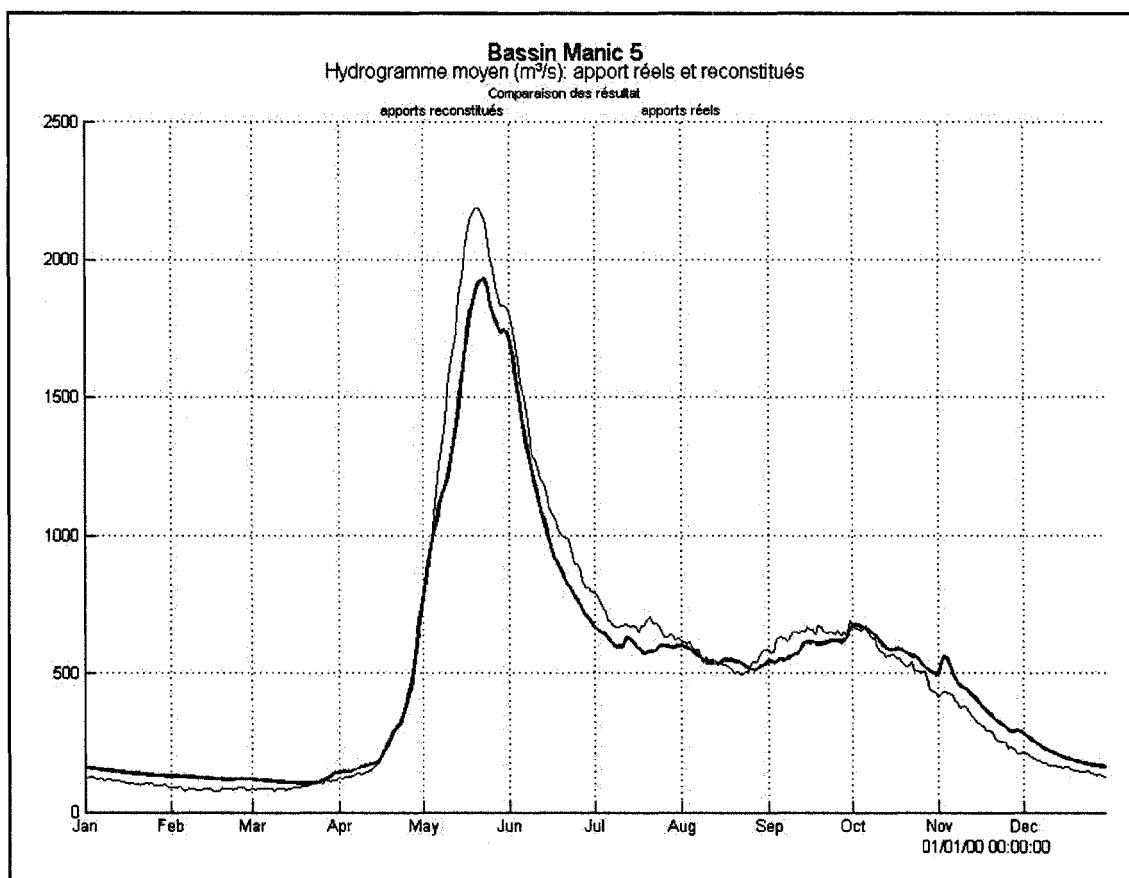
Annexe I-4 Grille du modèle ECHAM4 pour le Québec



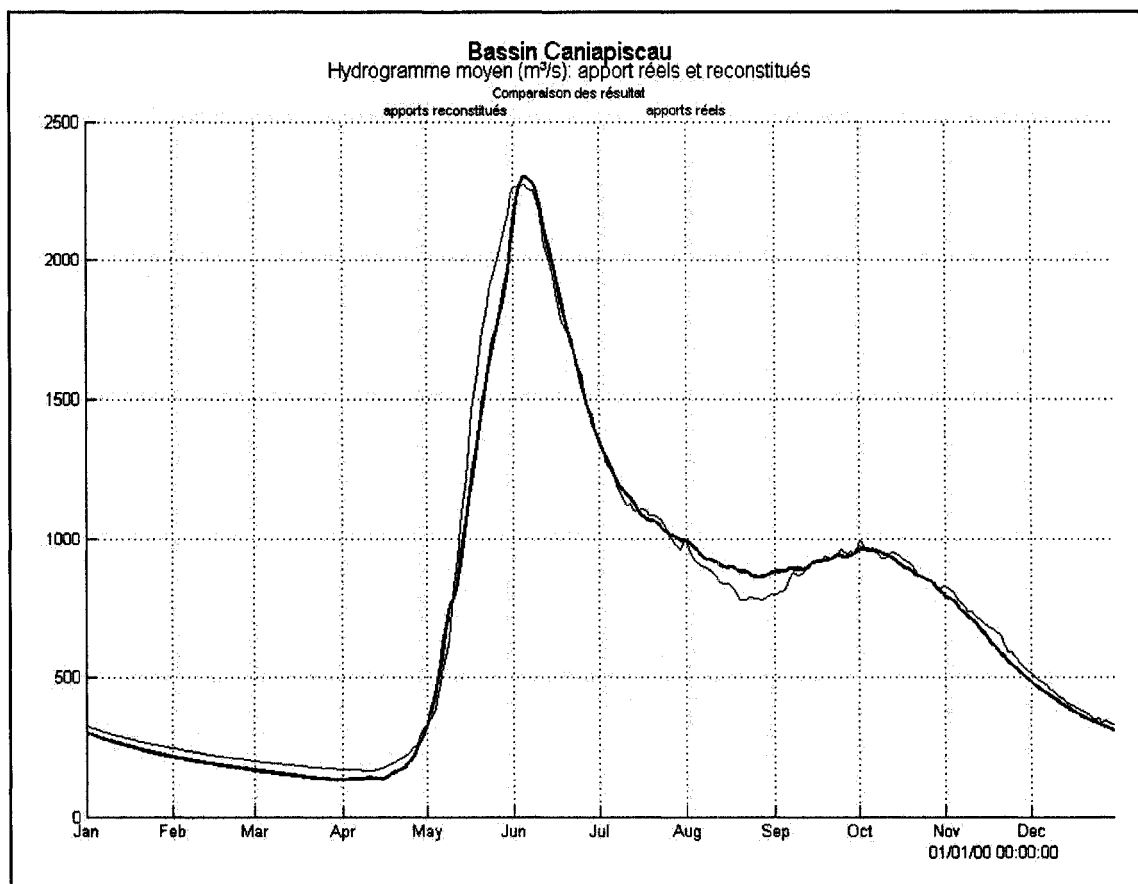
Annexe I-5 Grille du modèle CCSRNIES pour le Québec

ANNEXE II

CALIBRAGE DES BASSINS DE MANIC 5 ET DE CANIAPISCAU POUR LE MODÈLE HYDROLOGIQUE HSAMI



Annexe II-1 *Comparaison de l'hydrogramme observé et simulé selon le calibrage choisi pour le bassin de Manic 5*



Annexe II-2 *Comparaison de l'hydrogramme observé et simulé
selon le calibrage choisi pour le bassin de
Caniapiscou*

ANNEXE III

EXEMPLE DE CALCULS ASSOCIÉ À LA SUPERFICIE UTILISÉE POUR LES MAILLAGES DES MODÈLES CLIMATIQUES

L'exemple ici présenté correspond au modèle climatique HadCM3 pour la variable de précipitation.

dom = [-71 -63,5 51 55]

Modèle = HadCM3

Variable = précipitation

Coordonnées longitudinales (v_i) : [-82,5 -78,5 -75 -71,25 -67,5 -63,75 -60 -56,25]

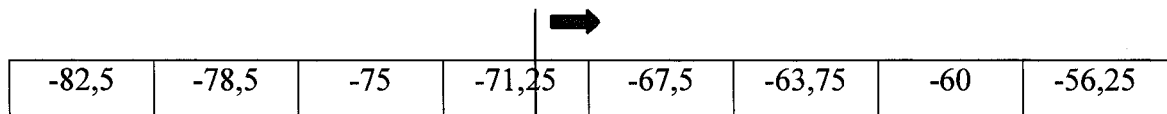
Coordonnées latitude (v_j) : [42,5 45 47,5 50 52,5 55 57,5 60 62,5]

Incrémentation en longitude (inc_i) = 3,75

Incrémentation en latitude (inc_j) = 2,5

- 1) Ratio en longitude de la longueur d'un point de grille qui superpose la surface à l'étude (PondLon) :

a) $Val1 = \max(v_i + inc_i/2 - dom(1), 0)$



-82,5	-78,5	-75	-71,25	-67,5	-63,75	-60	-56,25
-------	-------	-----	--------	-------	--------	-----	--------

donc la valeur maximale est récupérée entre $v_i + inc_i/2 - dom(1)$ et 0

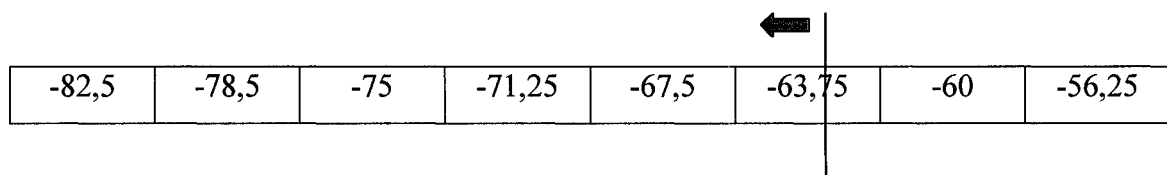
Ex : $\max(-82,5 + 3,75/2 - (-71), 0)$

$\max(-9,625 \text{ et } 0)$. La réponse est 0.

Résultats pour chaque coordonnée longitudinale :

[0 0 0 1,625 5,375 9,125 12,875 16,625]

b) $Val2 = \max(dom(2) - (v_i - inc_i/2), 0)$



-82,5	-78,5	-75	-71,25	-67,5	-63,75	-60	-56,25
-------	-------	-----	--------	-------	--------	-----	--------

donc la valeur maximale est récupérée entre $\text{dom}(2) - (v_i - \text{inc}_i/2)$ et 0

Ex : $\max(-63,5 - (-82,5 - 3,75/2), 0)$

$\max(20,875 \text{ et } 0)$. La réponse est 0.

Résultats pour chaque coordonnée longitudinale :

[20,875 17,125 13,375 9,625 5,875 2,125 0 0]

c) $\text{Val3} = \min(\text{Val1}, \text{Val2}, \text{inc}_i)$

0	0	0	1,625	5,375	9,125	12,875	16,625
20,875	14,125	13,375	9,625	5,875	2,125	0	0
3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75

donc $\text{Val3} = [0 \ 0 \ 0 \ 1,625 \ 3,75 \ 2,125 \ 0 \ 0]$

d) $\text{PondLon} = \text{Val3} / \text{inc}_i$

$\text{PondLon} = [0 \ 0 \ 0 \ 0,433 \ 1 \ 0,567 \ 0 \ 0]$

2) Ratio en latitude de la largeur d'un point de grille qui superpose la surface à l'étude (PondLat) :

Même procédure que pour PondLon

$\text{PondLat} = [0 \ 0 \ 0 \ 0,1 \ 1 \ 0,5 \ 0 \ 0]$

3) Ratio de la superficie des points de grille qui superpose la surface à l'étude :

$\text{Ratio1} = \text{PondLon} \times \text{PondLat}$

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,43	0,43	0,217	0	0
0	0	0	0,1	1	0,5	0	0
0	0	0	0,057	0,57	0,28	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

4) Fraction de chaque point de grille qui superpose la superficie à l'étude

$$\text{Ratio2} = \text{Ratio 1} / \Sigma (\text{Ratio1})$$

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,014	0,014	0,068	0	0
0	0	0	0,031	0,313	0,156	0	0
0	0	0	0,018	0,177	0,089	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

5) Application des ratios pour les variables climatiques de précipitation

Ex : précipitation mensuelle pour les maillages superposant la superficie à l'étude (janvier 1960)

2,0098	1,25	0,96
1,5098	0,9404	0,8701
2,1104	0,9805	0,6602

Précipitations pondérées par les ratios

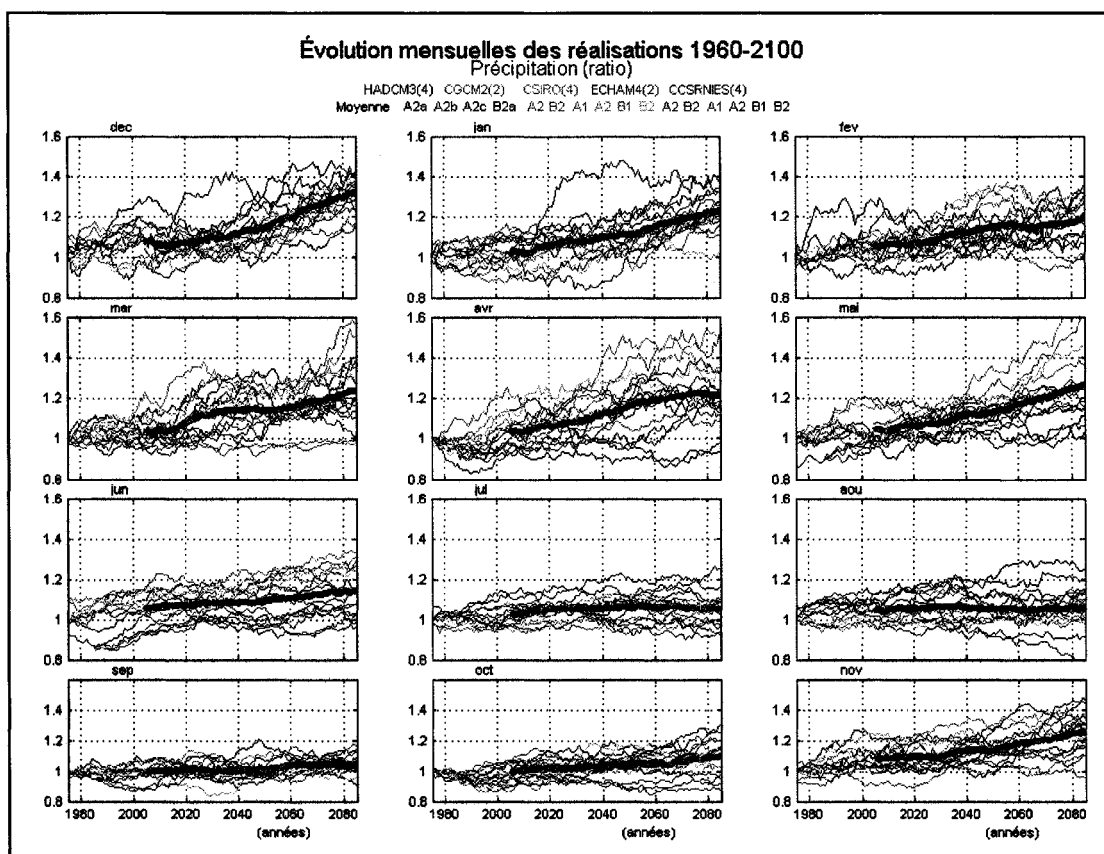
0,028	0,169	0,065
0,047	0,294	0,136
0,038	0,174	0,059

La somme de ces fractions de précipitations donne la précipitation qui correspond à la superficie à l'étude :

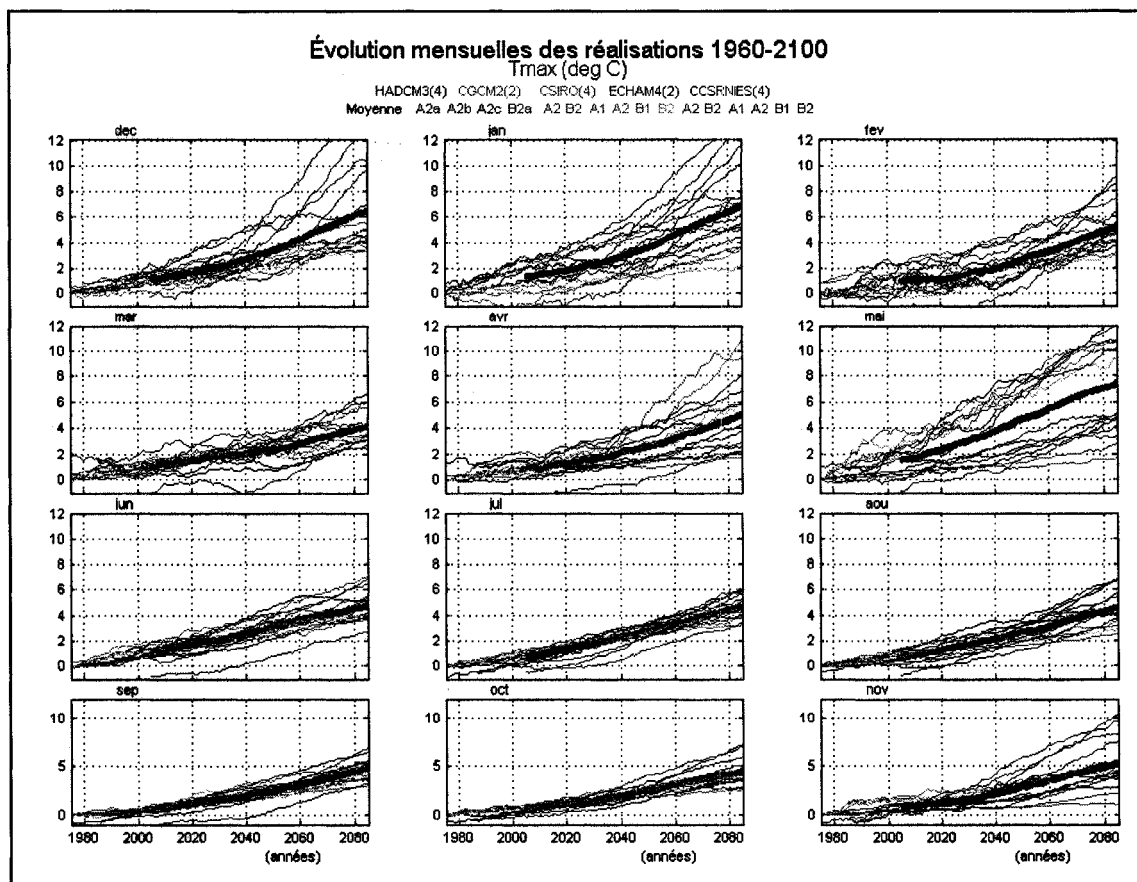
Précipitation pour janvier 1960 = 1,01 mm

ANNEXE IV

ÉVOLUTION MENSUELLE DES ANOMALIES CLIMATIQUES

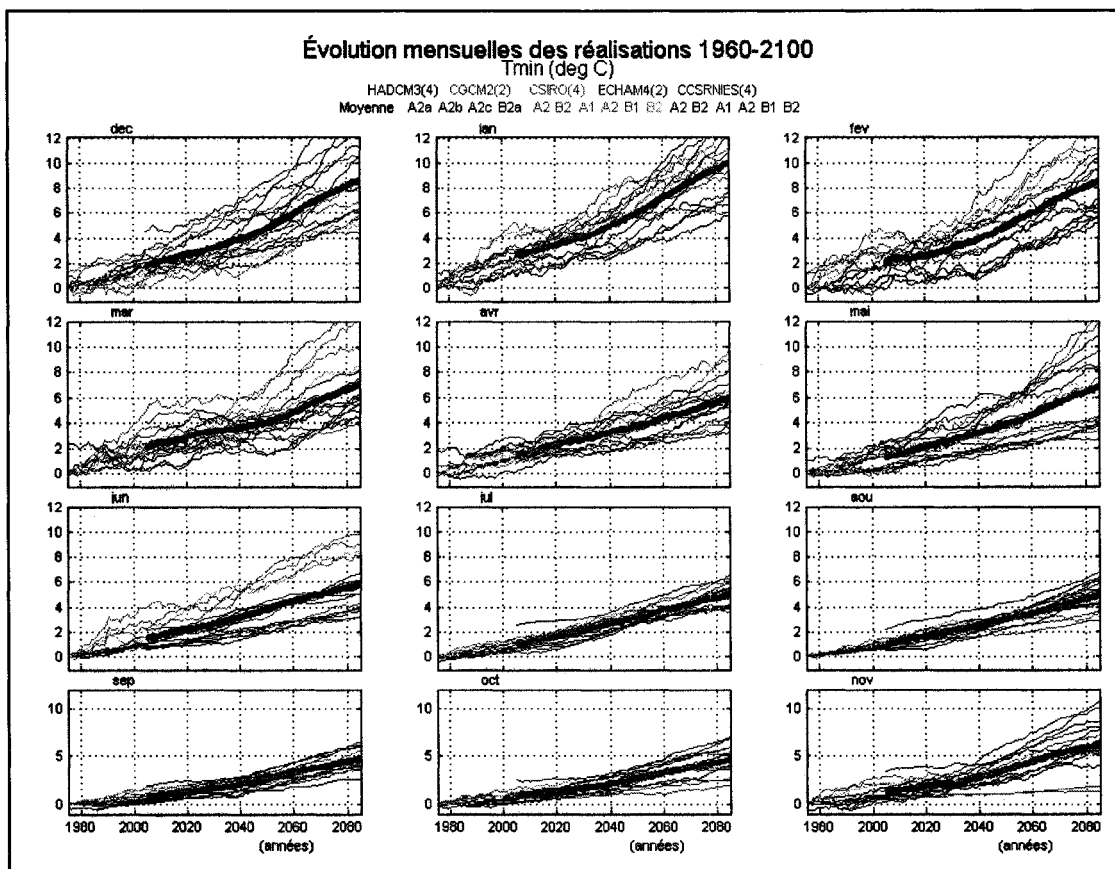


Annexe IV-1 *Évolution mensuelle des scénarios des différents modèles climatiques utilisés. Comparaison des deltas de précipitation à travers le temps (1960-2100)*



Annexe IV-2

Évolution mensuelle des scénarios des différents modèles climatiques utilisés. Comparaison des deltas de température maximale à travers le temps (1960-2100)



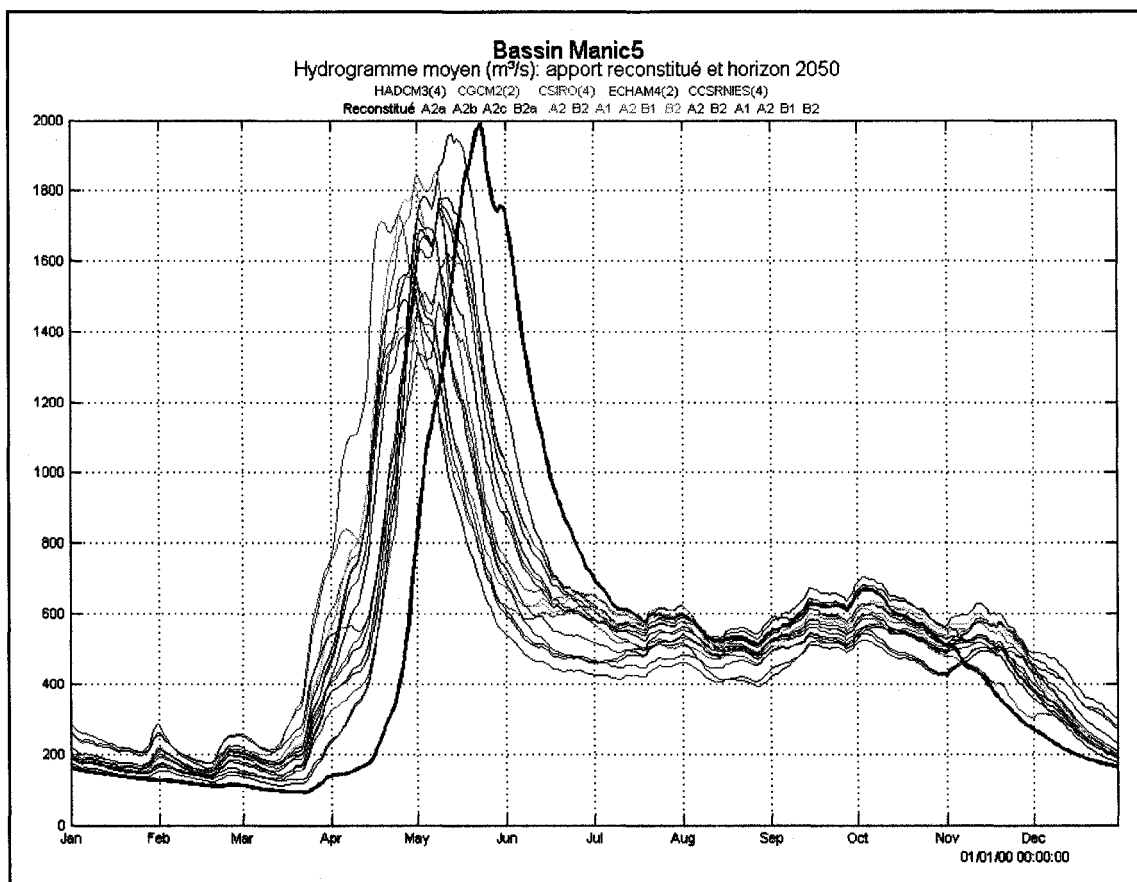
Annexe IV-3

Évolution mensuelle des scénarios des différents modèles climatiques utilisés. Comparaison des deltas de température minimale à travers le temps (1960-2100)

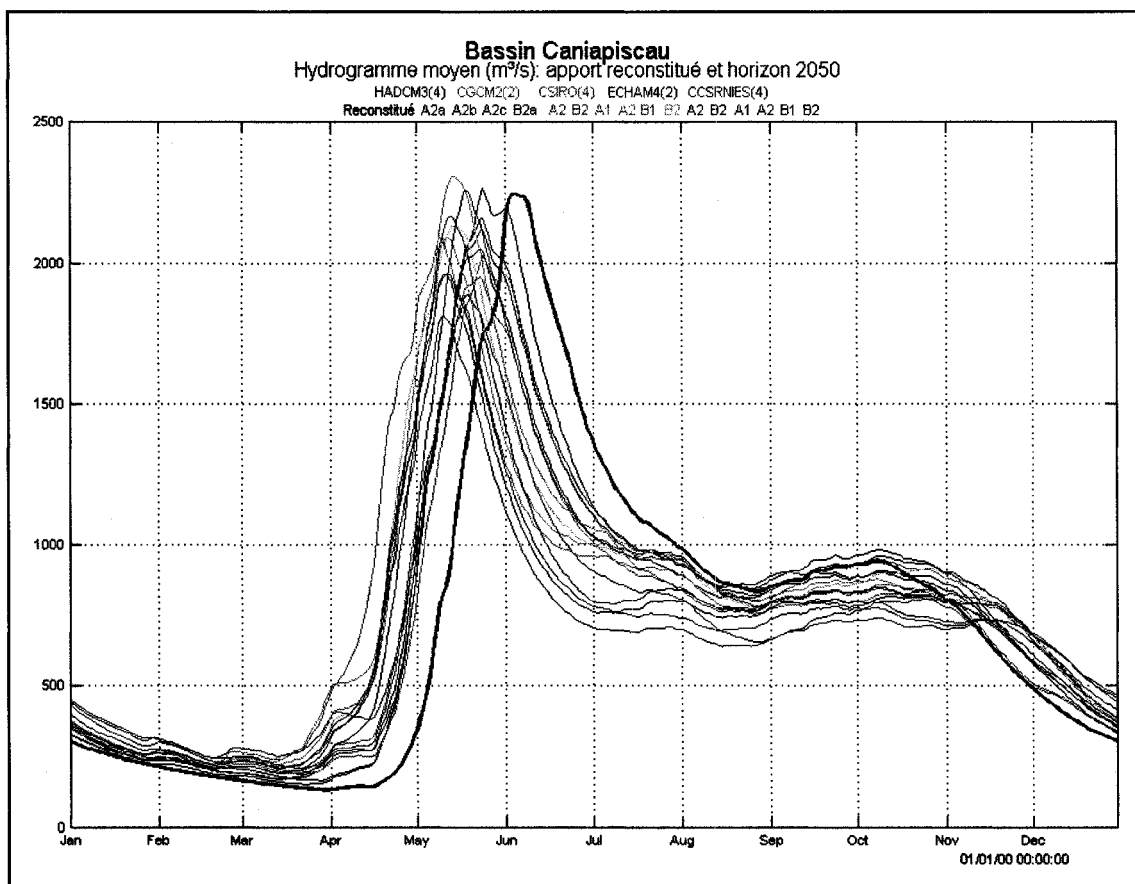
ANNEXE V

HYDROGRAMMES MOYENS DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES

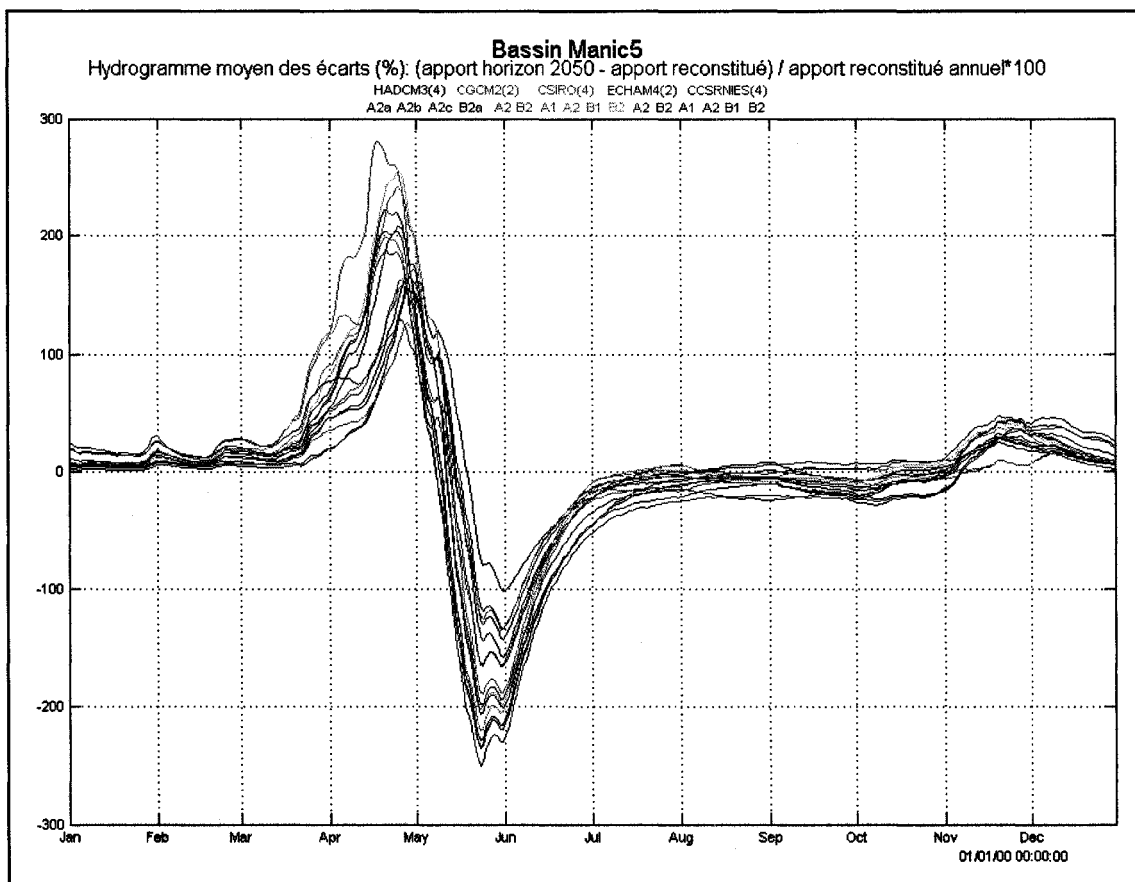
HORIZON 2050 POUR MANIC-5 ET CANIAPISCAU



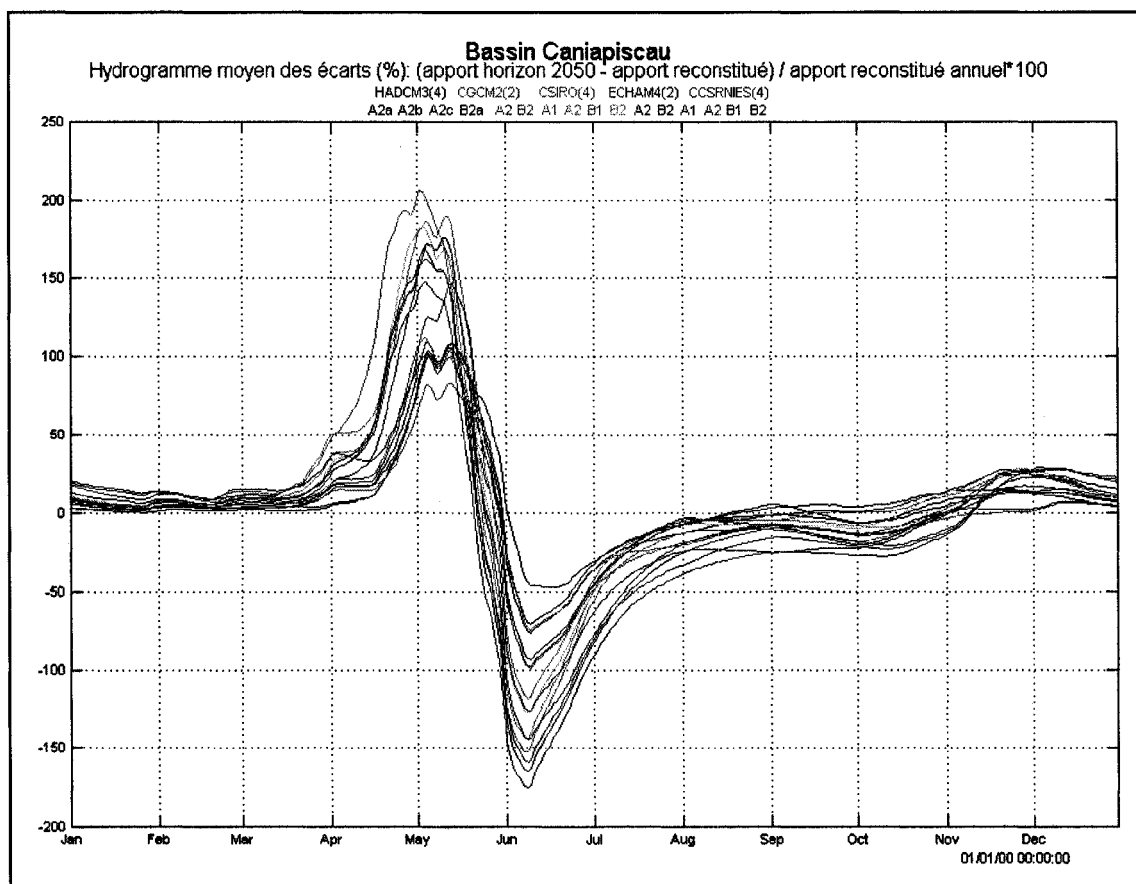
Annexe V-1 *Hydrogrammes moyens des scénarios climatiques horizon 2050 en comparaison avec la courbe d'apports reconstitués pour le bassin de Manic-5*



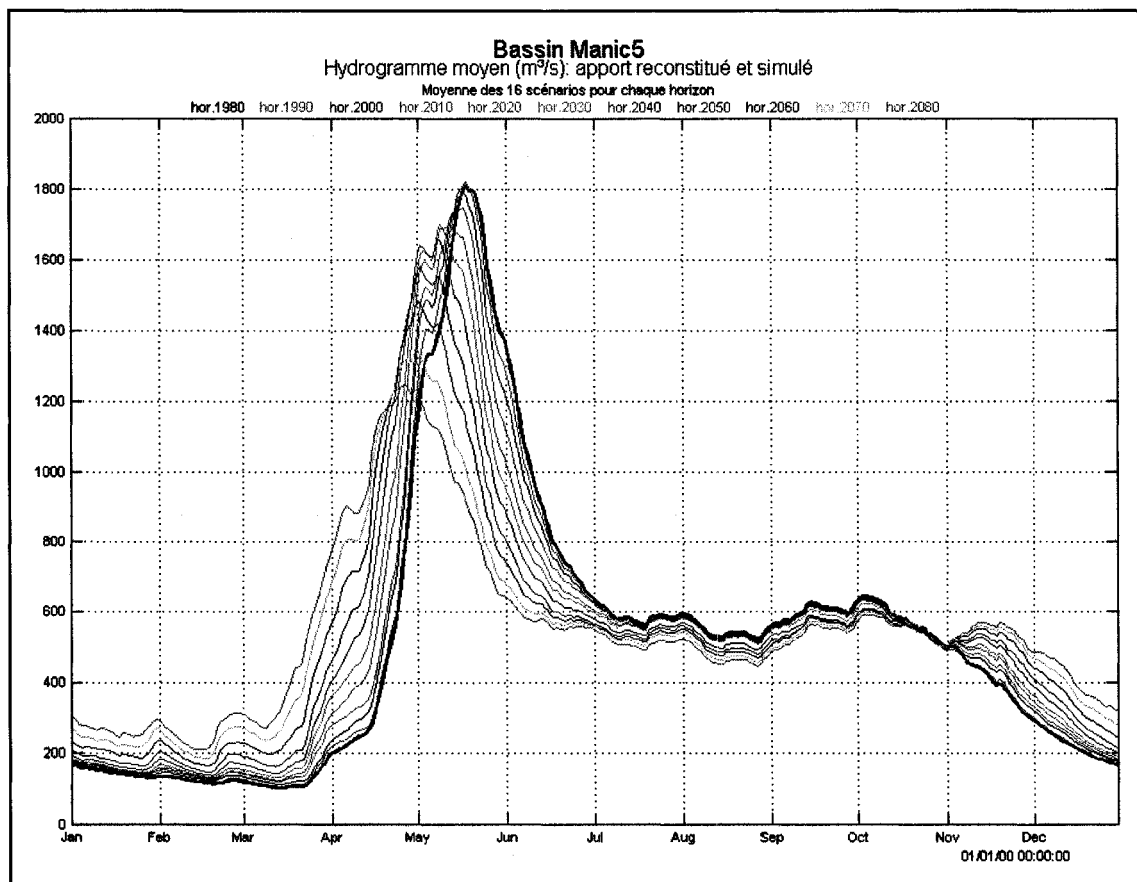
Annexe V-2 *Hydrogrammes moyens des scénarios climatiques horizon 2050 en comparaison avec la courbe d'apports reconstitués pour le bassin de Caniapiscou*



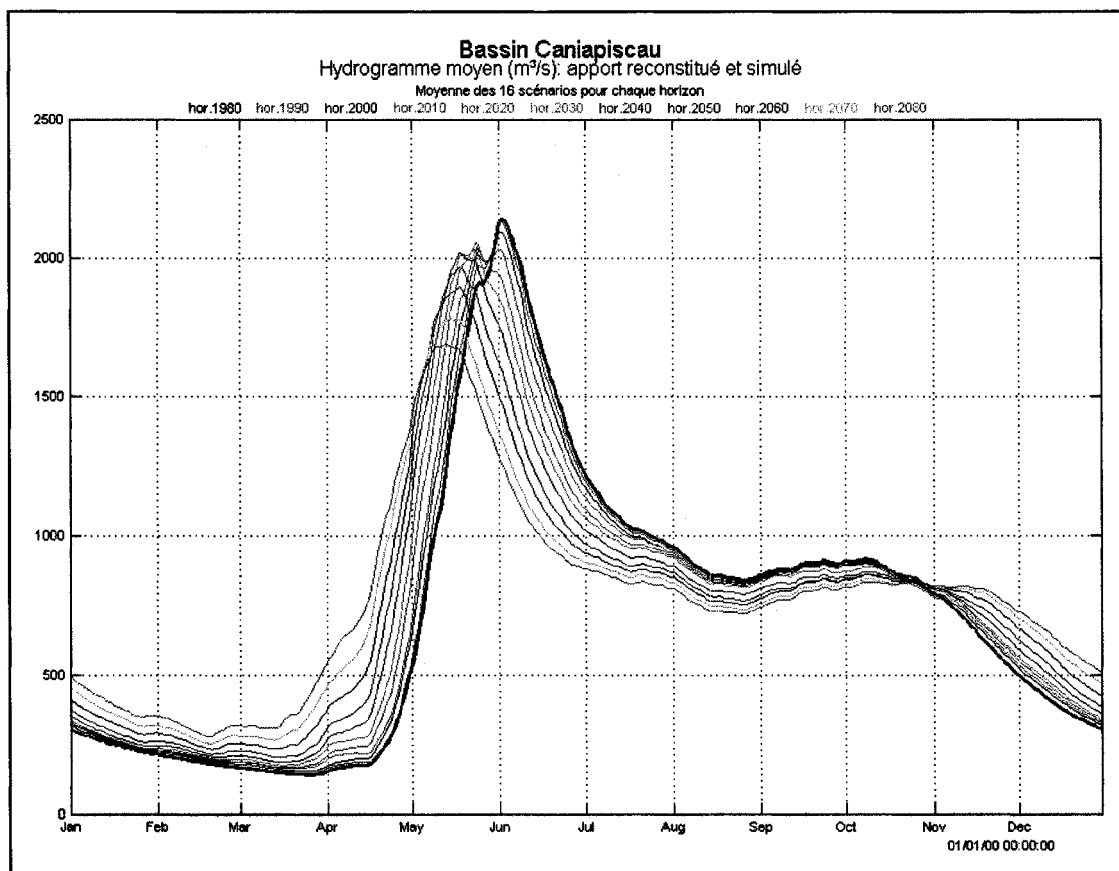
Annexe V-3 *Hydrogrammes moyens des écarts entre les apports simulés horizon 2050 et reconstitués pour le bassin de Manic-5*



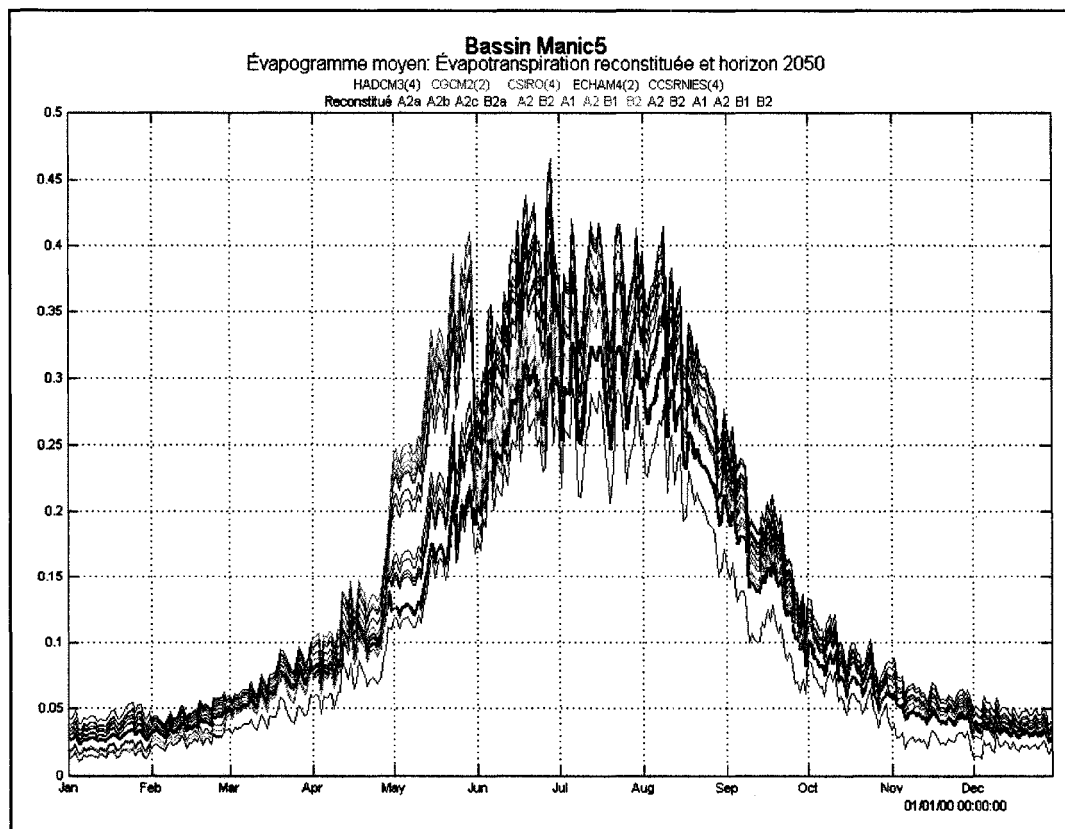
Annexe V-4 *Hydrogrammes moyens des écarts entre les apports simulés horizon 2050 et reconstitués pour le bassin de Caniapiscou*



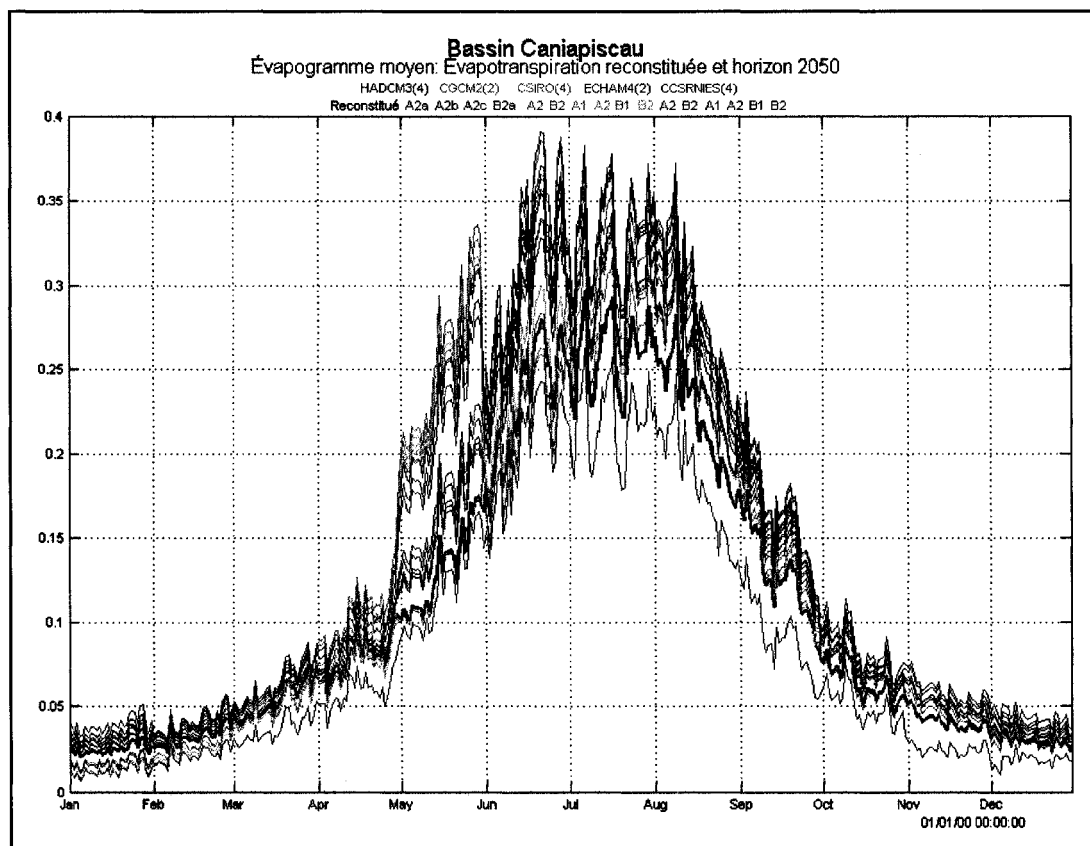
Annexe V-5 *Évolution des volumes d'eau moyens de l'horizon 1980 à 2080 pour le bassin de Manic-5*



Annexe V-6 *Évolution des volumes d'eau moyens del'horizon 1980 à 2080 pour le bassin de Caniapiscou*



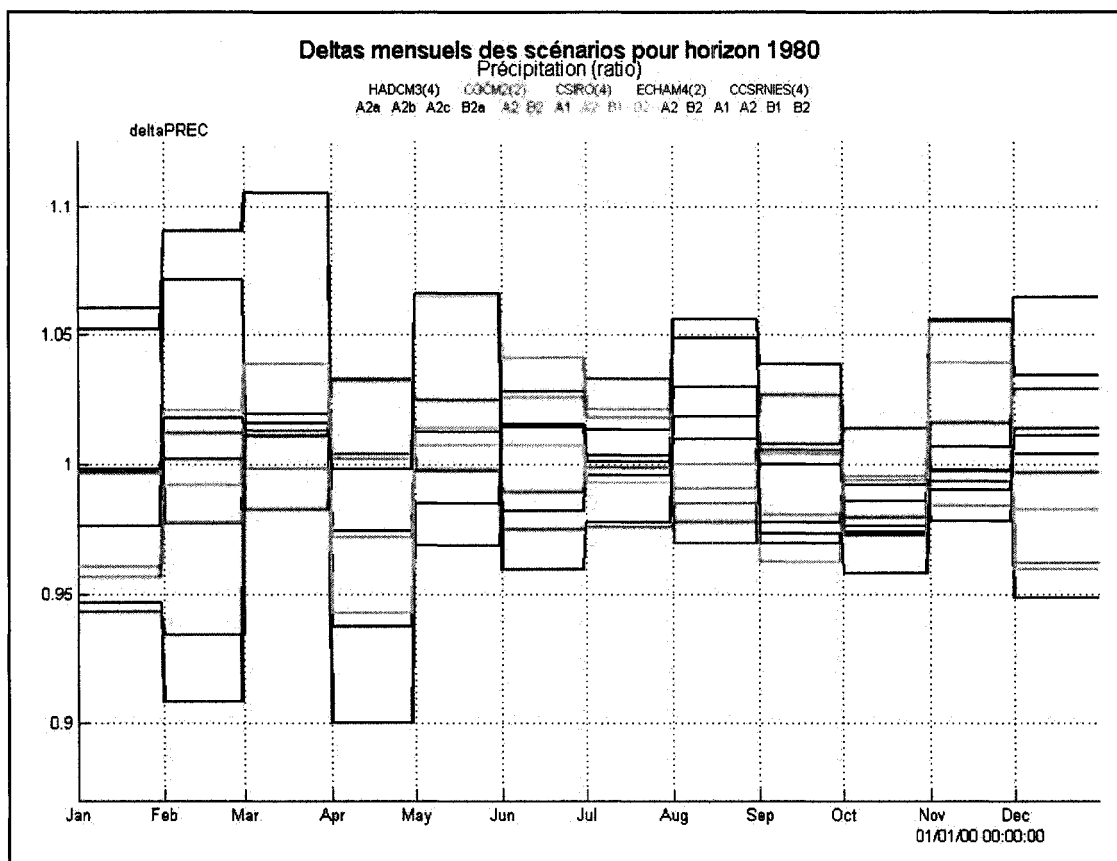
Annexe V-7 *Évapotranspiration potentielle reconstituée et simulée
horizon 2050 pour le bassin de Manic-5*



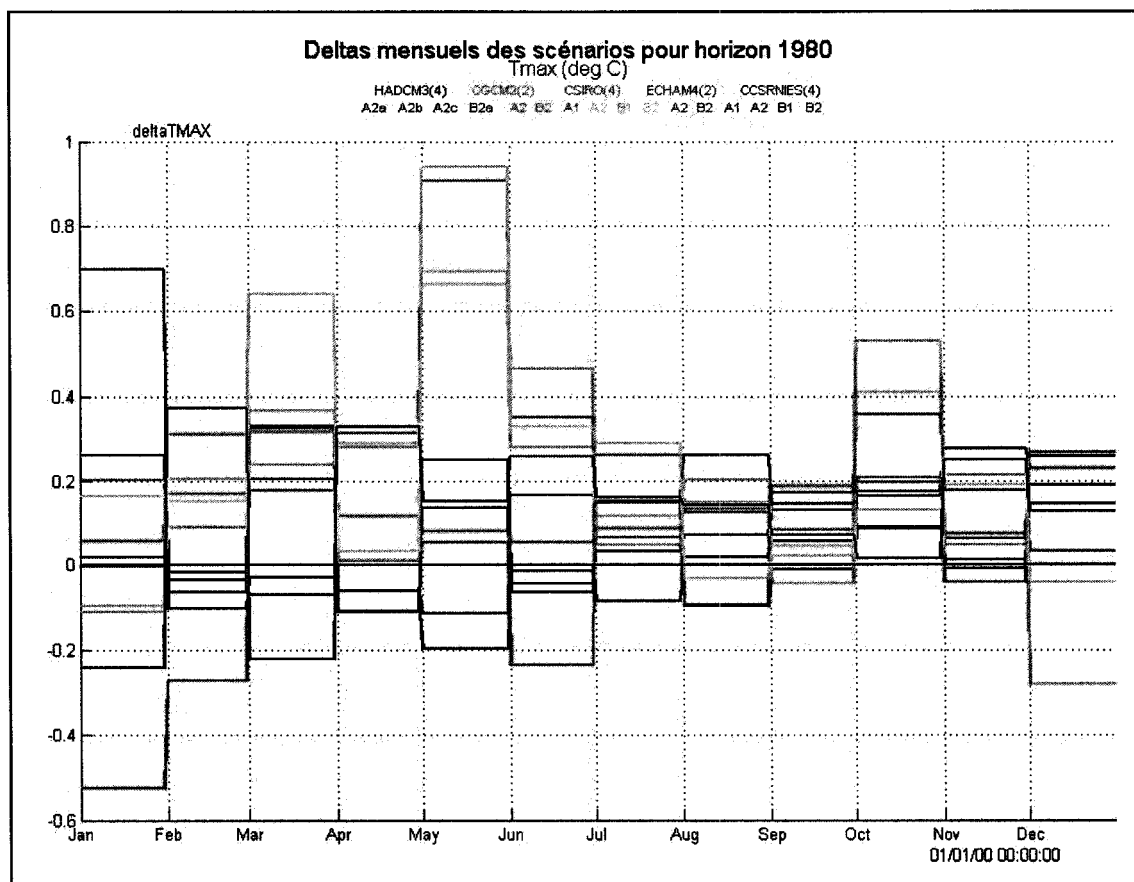
Annexe V-8 *Évapotranspiration potentielle reconstituée et simulée
horizon 2050 pour le bassin de Caniapiscou*

ANNEXE VI

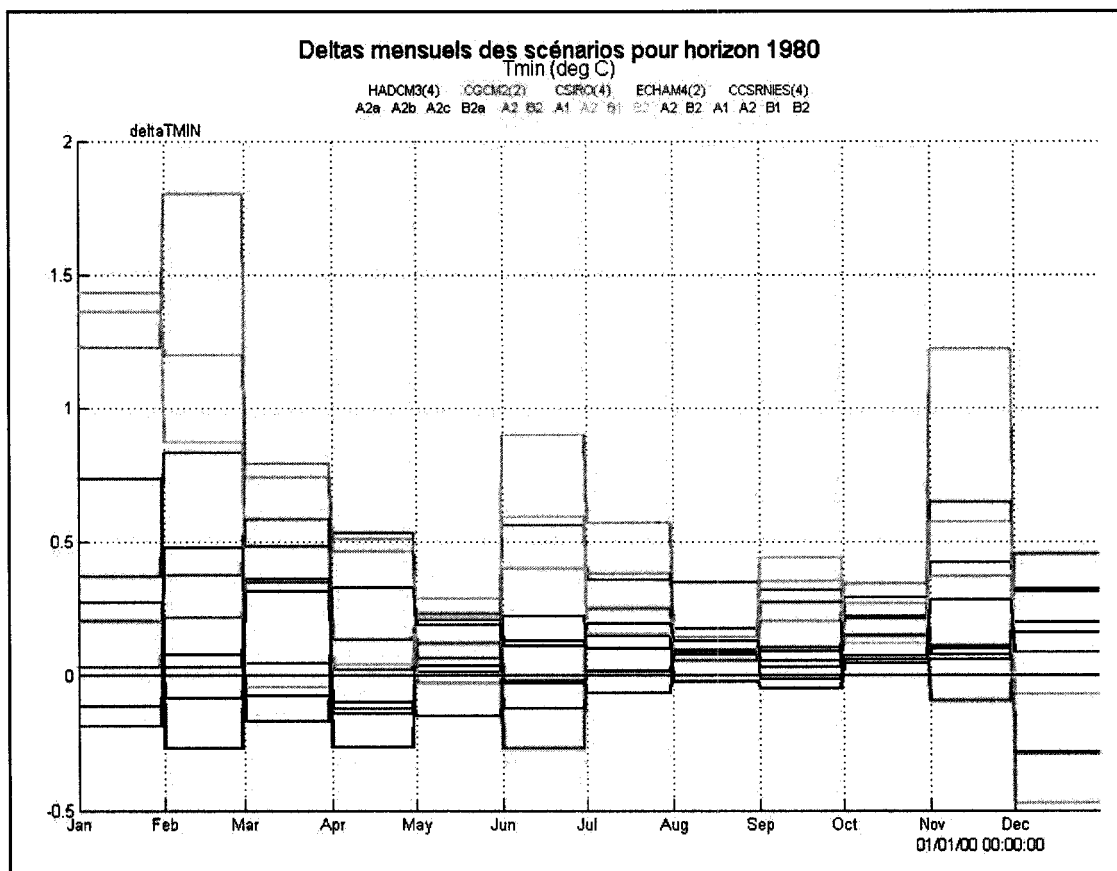
DELTAS DE PRÉCIPITATION, DE TEMPÉRATURES MAXIMALES ET MINIMALES POUR L'HORIZON 1980 DE L'ENSEMBLE DES SCÉNARIOS ET MODÈLES CLIMATIQUES



Annexe VI-1 *Deltas mensuels de précipitation horizon 1980
pour l'ensemble des scénarios*



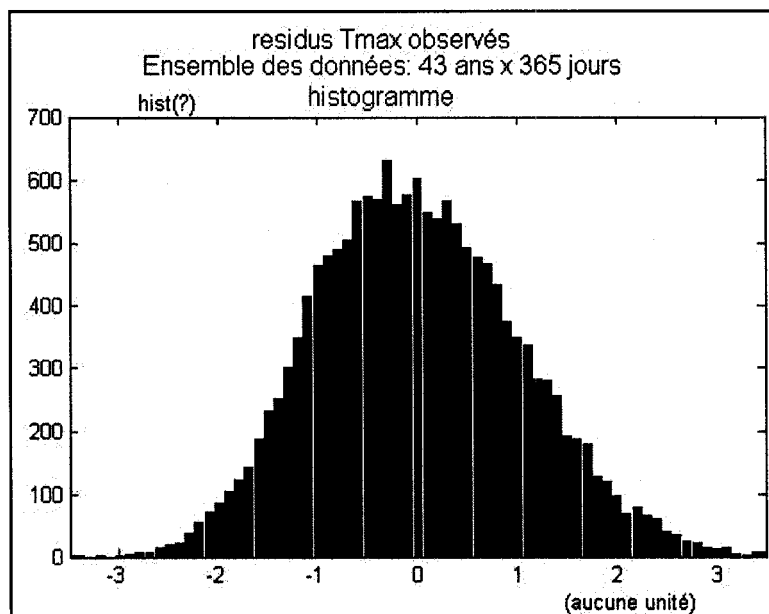
Annexe VI-2 *Deltas mensuels de température maximale horizon 1980
pour l'ensemble des scénarios*



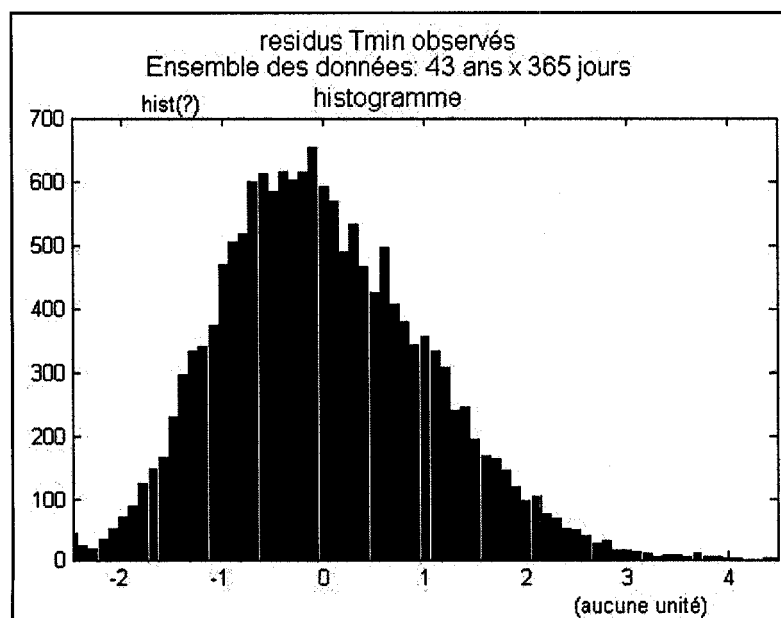
Annexe VI-3 *Deltas mensuels de température minimale horizon 1980 pour l'ensemble des scénarios*

ANNEXE VII

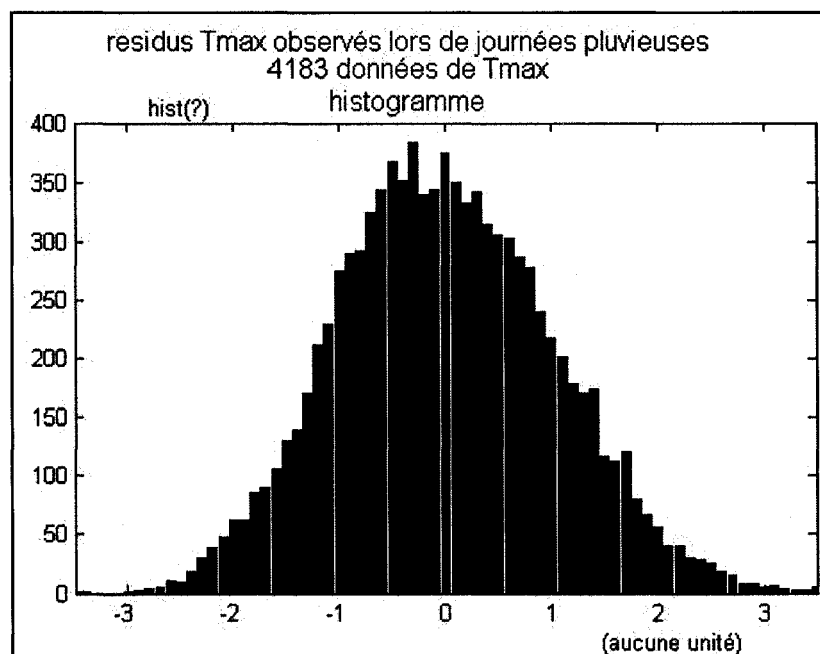
HISTOGRAMMES DES RÉSIDUS DE TEMPÉRATURES MAXIMALES ET MINIMALES



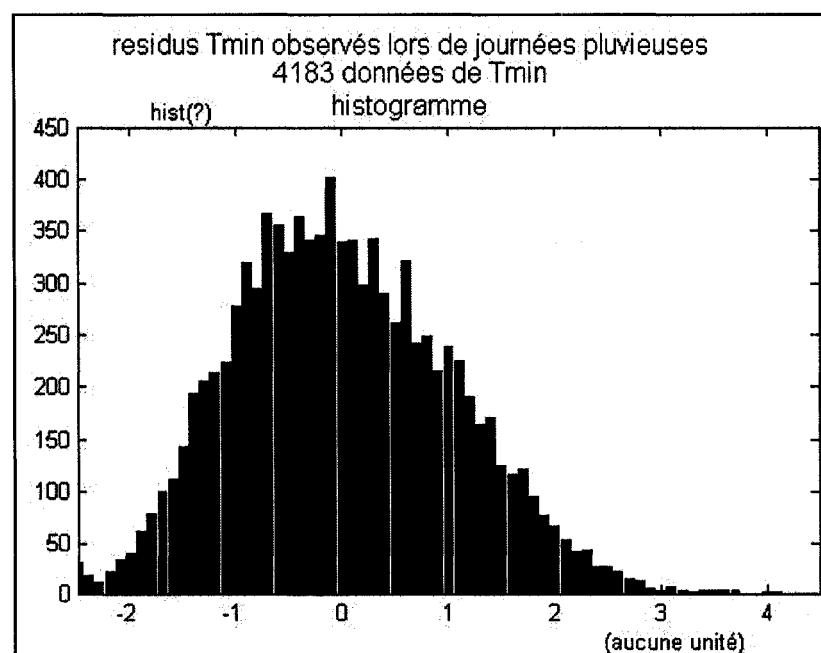
Annexe VII-1 *Histogramme des résidus de température maximale pour l'ensemble des données, journées pluvieuses et sèches confondues*



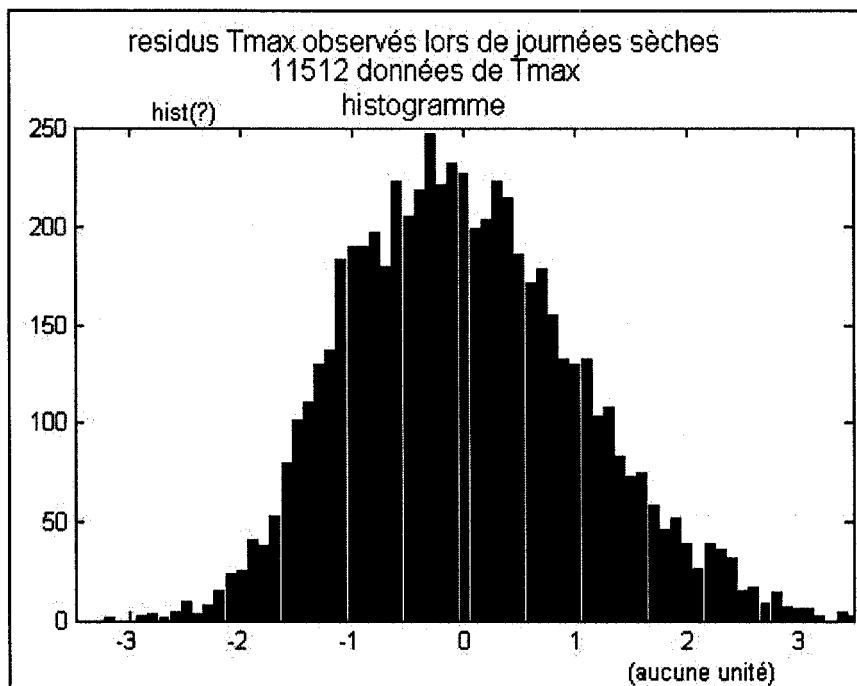
Annexe VII-2 *Histogramme des résidus de température minimale pour l'ensemble des données, journées pluvieuses et sèches confondues*



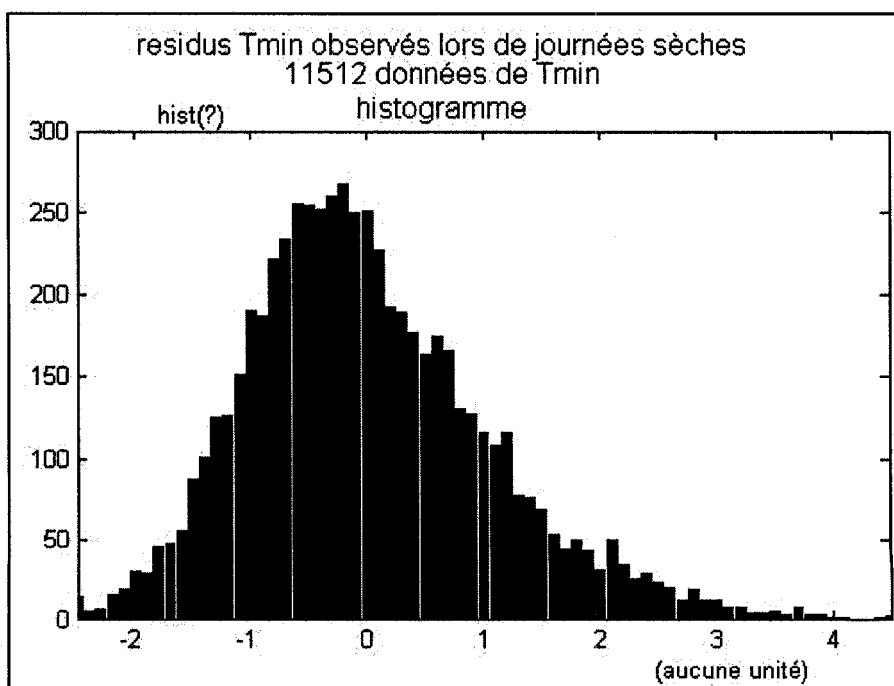
Annexe VII-3 *Histogramme des résidus de température maximale pour les données correspondant aux journées pluvieuses*



Annexe VII-4 *Histogramme des résidus de température minimale pour les données correspondant aux journées pluvieuses*



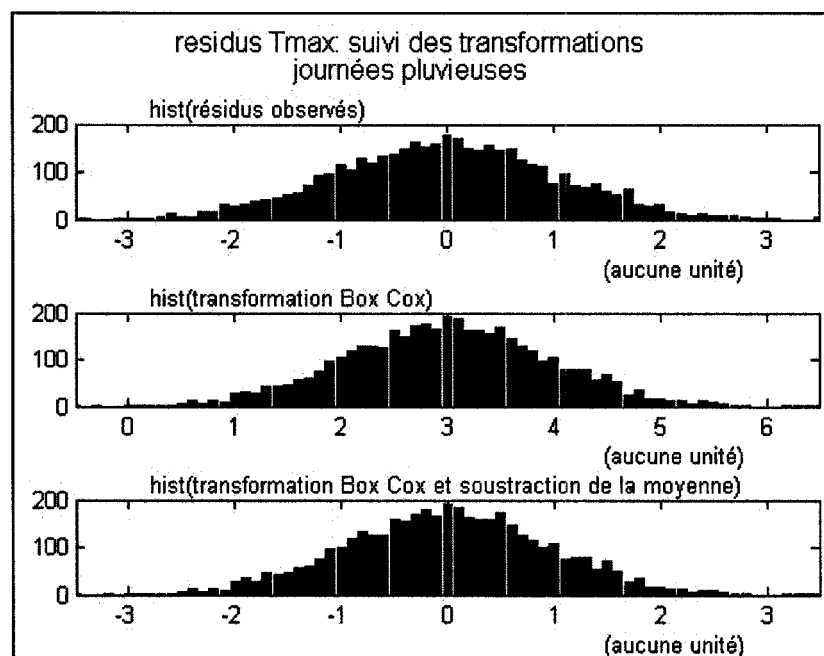
Annexe VII-5 *Histogramme des résidus de température maximale pour les données correspondant aux journées sèches*



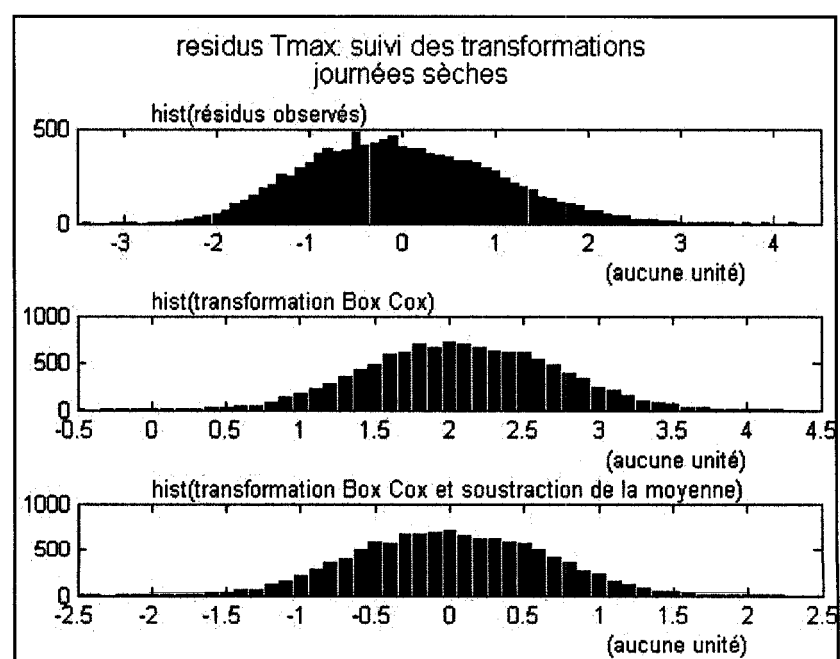
Annexe VII-6 *Histogramme des résidus de température minimale pour les données correspondant aux journées sèches*

ANNEXE VIII

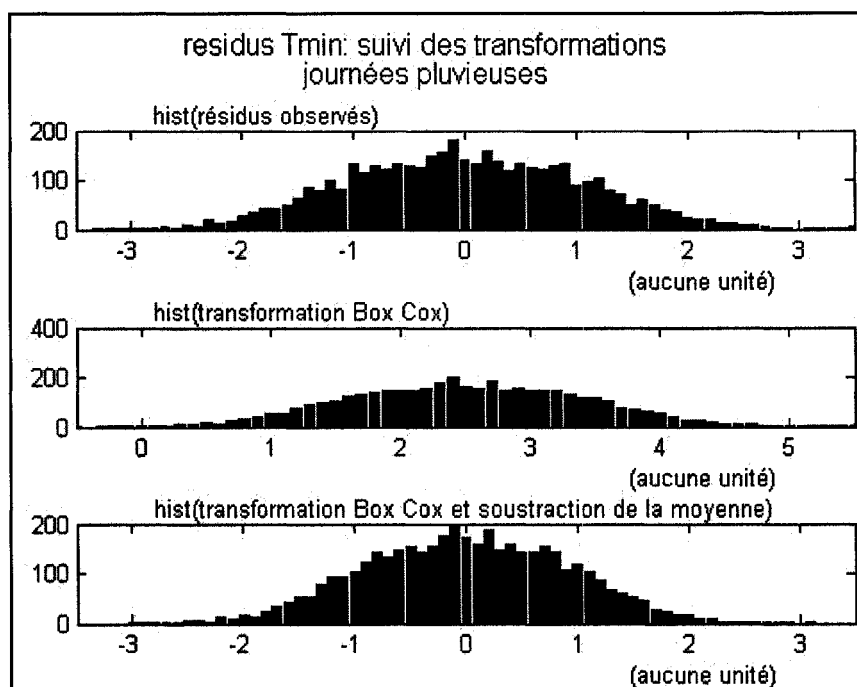
LES ÉTAPES DE LA TRANSFORMATION BOX-COX DANS LE GÉNÉRATEUR DE CLIMAT



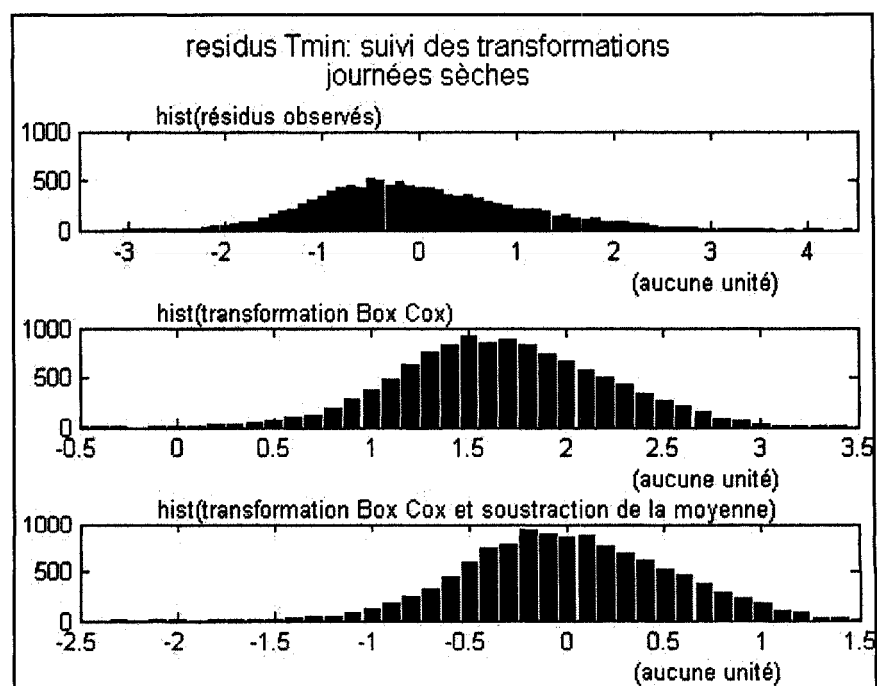
Annexe VIII-1 *Transformation Box-Cox des résidus des températures maximales lors de journées pluvieuses*



Annexe VIII-2 *Transformation Box-Cox des résidus des températures maximales lors de journées sèches*



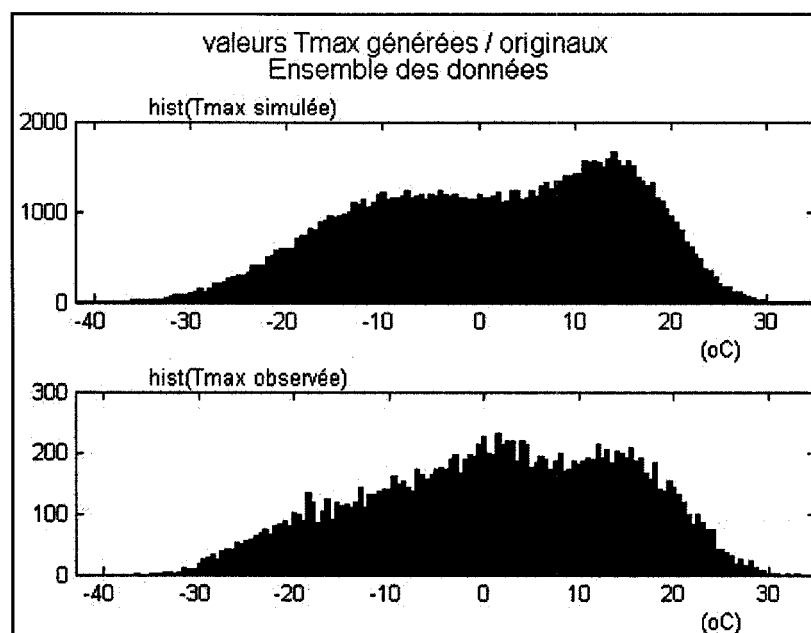
Annexe VIII-3 *Transformation Box-Cox des résidus des températures minimales lors de journées pluvieuses*



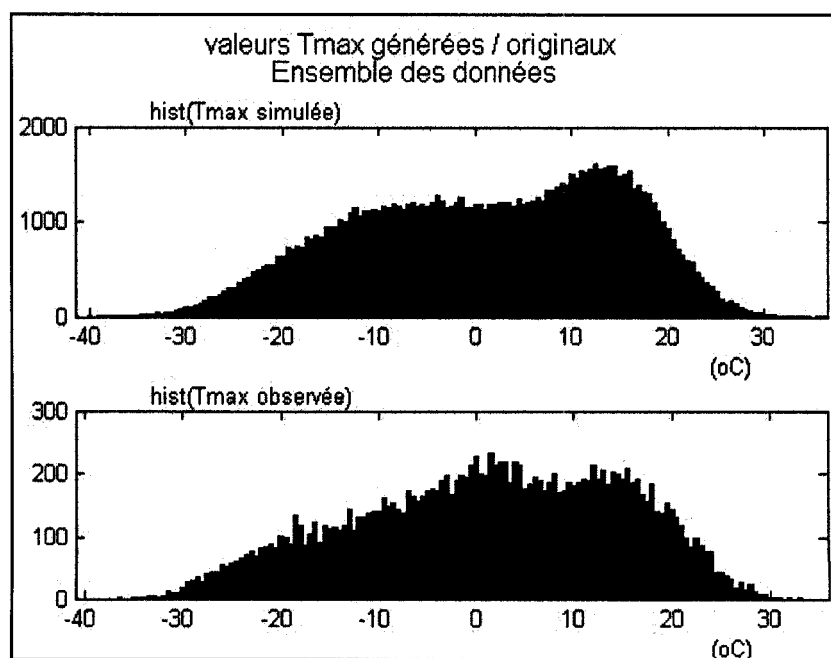
Annexe VIII-4 *Transformation Box-Cox des résidus des températures minimales lors de journées sèches*

ANNEXE IX

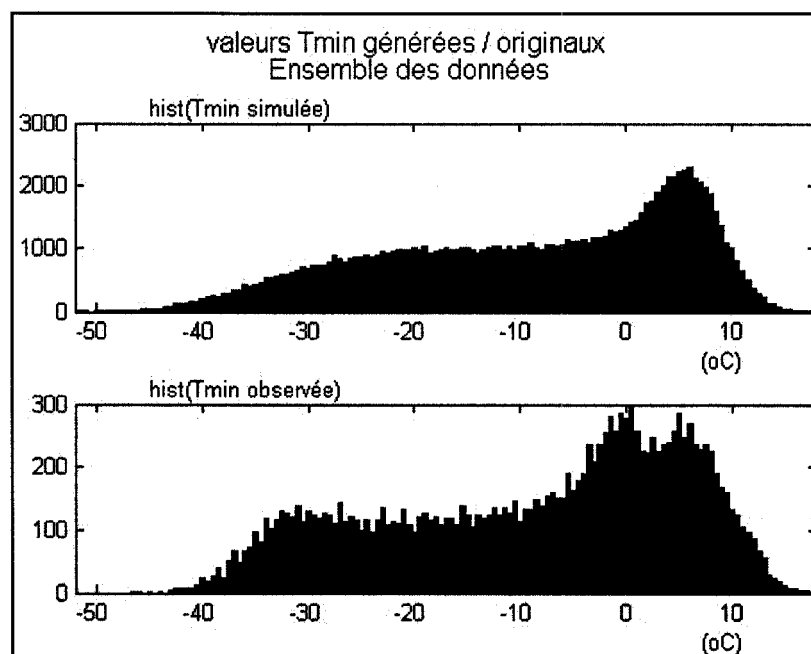
RÉSULTATS DES SÉRIES SYNTHÉTIQUES POUR LE GÉNÉRATEUR DE CLIMAT ORIGINAL ET SELON LA TRANSFORMATION BOX-COX



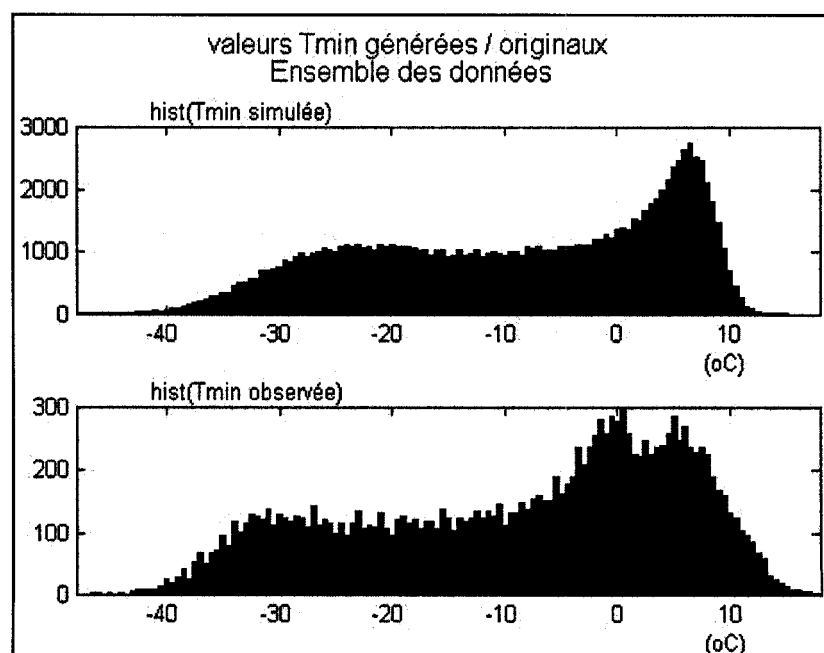
Annexe IX-1 *Histogrammes des températures maximales observées en comparaison aux valeurs simulées avec WeaGETS original*



Annexe IX-2 *Histogrammes des températures maximales observées en comparaison aux valeurs simulées avec WeaGETS modifié avec Box-Cox*



Annexe IX-3 *Histogrammes des températures minimales observées en comparaison aux valeurs simulées avec WeaGETS original*



Annexe IX-4 *Histogrammes des températures minimales observées en comparaison aux valeurs simulées avec WeaGETS modifié avec Box-Cox*

BIBLIOGRAPHIE

- Abbott, Michael B., James C. Bathurst, Jean A. Cunge, Patrick E. O'Connell et Jorn Rasmussen. 1986. «An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen (SHE). 1: History and philosophy of a physically-based distributed modeling systems». *Journal of hydrology*, vol. 87, p.45-59.
- Agence spatiale canadienne (ASC). Site du Service météorologique du Canada. 2002. *Survol du projet CRYISIS et résultats récents*. En ligne. <http://www.msc-smc.ec.gc.ca/crysys/overview/crysys_overview_2002_f.pdf> consulté le 25 juin 2005.
- Aksoy, Hafzullah. 2000. «Use of gamma distribution in hydrological analysis». *Turkish journal of engineering and environmental sciences*, vol. 24, n° 4, p.419-428.
- Anderson, Christopher J., Raymond W. Arritt, Eugene S. Takle, Zaitao T. Pan, William J. Gutowski, Francis O. Otieno, Renato Da Silva, Daniel Caya, Jens H. Christensen, Daniel Luthi, Miguel A. Gaerter, Clemente Gallardo, Filippo Giorgi, Song-You Hong, Colin Jones, H.-M. H. Juang, Jack J. Katzfey, William M. Lapenta, René Laprise, Jay W. Larson, Glen E. Liston, John L. McGregor, Roger A. Pielke, John O. Roads et John A. Taylor. 2003. «Hydrological processes in regional climate simulations of the central United States flood of june-july 1993». *Journal of hydrometeorology*, vol. 4, n° 3, p.584-598.
- Arnell, Nigel W. 1999a. «Climate change and global water resources». *Global Environmental Change*, vol. 9, p. S31-S49.
- Arnell, Nigel W. 1999b. «A simple water balance model for the simulation of streamflow». *Journal of hydrology*, vol. 217, p. 314-335.
- Arnell, Nigel W., Matthew J. L. Livermore, Sari Kovats, Peter E. Levy, Rob Nicholls, Martin L. Parry et Stuart R. Gaffin. 2004. «Climate and socio-economic scenarios for global-scale climate change impacts assessments: characterising the SRES storylines». *Global Environmental Change*, vol. 14, p. 3-20.
- Bacher, Andreas, Josef M. Oberhuber et Erick Roeckner. 1998. «ENSO dynamics and seasonal cycle in the tropical Pacific as simulated by the ECHAM4/OPYC3 coupled general circulation model». *Climate Dynamics*, vol. 14, p. 431-450.
- Baillargeon, Gérald. 1990. *Méthodes statistiques de l'Ingénieur*, 3^e édition, Trois-Rivières : Les Éditions SMG.

- Banton, Olivier et Lumony M. Bangoy. 1997. *Hydrogéologie. Multiscience environnementale des eaux souterraines*. AUPELF et Presses de l'Université du Québec.
- Barrow, Elaine M. et Rick J. Lee. 2000. *Guide du changement climatique aux fins des évaluations environnementales, Changement climatique et évaluation environnementale*. Collection de monographies en recherche et développement, Agence canadienne d'évaluation environnementale.
- Ben-Zvi, Arie et Benjamin Azmon. 1997. «Joint use of L-moment diagram and goodness-of-fit test: a case study of diverse series». *Journal of hydrology*, vol. 198, n° 1-4, p. 245-259.
- Birnbaum, Zygmund W. 1952. «Numerical tabulation of the distribution of Kolmogorov's statistic for finite sample size». *Journal of american statistical association*, vol. 47, p. 425-441.
- Bisson, J. L., F. Roberge. 1983. *Prévision des apports naturels: Expérience d'Hydro-Québec*. Compte-rendu de l'Atelier sur la prévision du débit, Toronto.
- Blom, Gunnar. 1958. «Statistical estimates and transformed beta variables». *John Wiley and sons*, New York.
- Boer, Georges J. 2004. «Long time-scale potential predictability in an ensemble of coupled climate models». *Climate dynamics*, vol. 23, n° 1, p. 29-44.
- Bogardi, Istvan, Istvan Matyasovszky, Andras Bardossy et Lucien Duckstein. 1993. «Application of a space-time stochastic model for daily precipitation using atmospheric circulation patterns». *Journal of geophysical research*, vol. 98, p. 653-667.
- Boorman, David B. and C. E. M. Sefton. 1997. «Recognising the uncertainty in the quantification of the effects to climate change on hydrological response». *Climatic Change*, vol. 35, p. 415-434.
- Bourque, Alain. 2002. «État des connaissances en science des changements climatiques: le climat changera-t-il vraiment au 21e siècle?» Dans *65^e Congrès de l'Ordre des agronomes du Québec*. Montréal, 16 p.
- Box Georges E. P. et David R. Cox. 1964. «An analysis of transformation». *Journal of royal statistical society*, series B26, p. 211-246.

- Brandsma, Theo et T. Adri Buishand. 1997. «Statistical linkage of daily precipitation in Switzerland to atmospheric circulation and temperature». *Journal of hydrology*, vol. 198, n° 1-4, p. 98-123.
- Buishand, T. Adri and Theo Brandsma. 1999. «Dependence of precipitation on temperature at Florence and Livorno (Italy)». *Climate research*, vol. 12, p. 53-63.
- Buishand, T. Adri, Marina V. Shabalova, et Theo Brandsma. 2004. «On the choice of the temporal aggregation level for statistical downscaling of precipitation». *Journal of Climate*, vol. 17, p. 1816-1827.
- Bureau of meteorology. Commonwealth of Australia. 2006. *The greenhouse effect and climate change*. En ligne. <<http://www.bom.gov.au/info/greenhouseeffectandclimatechange.pdf>>. Consulté le 15 octobre 2006.
- Burger, Gerd et Youmin Chen. 2005. «Regression-based downscaling of spatial variability for hydrologic applications». *Journal of hydrology*, vol. 311, n° 1-4, p. 299-317.
- Busuioc, Aristita et Hans von Storch, et Reiner Schnur. 1999. «Verification of GCM-generated regional seasonal precipitation for current climate and of statistical downscaling estimates under changing climate conditions». *Journal of Climate*, vol.12, p. 258-272.
- Busuioc, Aristita et Hans von Storch. 2003. «Conditional stochastic model for generating *daily* precipitation time series». *Climate research*, vol. 24, p. 181-195.
- Canadian Institute for Climate Studies (CICS). 2003. *Canadian Climate Impacts Scenarios*. En ligne. <<http://www.cics.uvic.ca/scenarios>>. Consulté régulièrement.
- Caron, Annie. Site de Ouranos. 2004. *Calibration et validation d'un générateur de climat*. En ligne. <<http://www.ouranos.ca/doc/chateauguay3/Caron.pdf>>. Consulté le 15 octobre 2004.
- Caron, Annie. 2006. «Étalonnage et validation d'un générateur de climat dans le contexte de changements climatiques». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie, Montréal, 134 p.

- Carter, Timothy, R., Mike Hulme et Murari Lal. Site du GIEC. 1999. *Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*. En ligne. <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/guidelines/ggm_no1_v1_12-1999.pdf>. Consulté le 6 avril 2005.
- Caya, Daniel. 2004. «Les projections climatiques à l'aide de MRC». In *57^e Congrès annuel de l'association canadienne des ressources hydriques*. (Montreal, June 16-18).
- Collier, Christopher G. et Roman Krzysztofowicz. 2000. «Special issue: Quantitative precipitation forecasting». *Journal of hydrology*, vol. 239, n° 1-4, p. 1-340.
- Collins, Mat. 2002. «Climate predictability on interannual to decadal time scales: the initial value problem». *Climate dynamics*, vol. 19, p. 671-692.
- Collischonn, Walter, Reinaldo Haas, Ivanilto Andreolli et Carlos Eduardo M. Tucci. 2005. «Forecasting river Uruguay flow using rainfall forecasts from a weather prediction model». *Journal of hydrology*, vol. 305, p. 87-98.
- Corte-Real, Joao, Hong Xu et Budong Qian. 1999. «A weather generator for obtaining daily precipitation scenarios based on circulation patterns». *Climate research*, vol. 13, p. 61-75.
- Coulibaly, Paulin, Taha Ouarda, et Bernard Bobée. 2001. «Comment améliorer la précision de prévisions hydrologiques?». *Water news profile*, vol. 20, n° 2.
- Coulibaly, Paulin, Mario Haché, Vincent Fortin, Marc Durocher et Bernard Bobée. 2002. *Nouvelles méthodes de prévision*. «Rapport final du projet T.2.1 – Phase II de la Chaire en hydrologie statistique», INRS-ETE, rapport de recherche confidentiel, R-612, 60 p.
- Coulibaly, Paulin et Yonas B. Dibike. 2004. «Downscaling global climate model outputs to study the hydrologic impact of climate change. Part II : scenario simulation and hydrologic modeling». *6th International conference on hydroinformatics – Liong, Phoon and Babovic*. (Singapore, June 21-24 2004), p.1449-1457. World Scientific Publishing Company.
- Curry, Ruth, Bob Dickson et Igor Yashayaev. 2003. «A change in the freshwater balance of the Atlantic Ocean over the past four decades». *Nature*, vol. 426, p. 826-829.
- Damrath, Ulrich, G. Doms, Dieter Frühwald, Erdmann Heise, Bernd Richter et Jurgen Steppeler. 2000. «Operational quantitative precipitation forecasting at the German weather service». *Journal of hydrology*, vol. 239, p. 260-285.

- Department of the Environment and Heritage Australian Greenhouse Office (AGO).
2004. *The impact of Greenhouse warming on the El Nino Southern Oscillation*.
En ligne. <<http://www.greenhouse.gov.au/science/factsheet/enso.html>>.
Consulté le 15 juillet 2005.
- Diaz-Nieto, Jacqueline et Robert L. Wilby. 2005. «A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom». *Climatic Change*, vol. 69, n° 2-3, p. 245-268.
- Dibike, Yonas B. et Paulin Coulibaly. 2004. «Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed». In *57th Canadian water resources association annual congress*. (Montreal, June 16-18).
- Dickinson, Robert E., Ron M. Errico, Filippo Giorgi et Gary T. Bates. 1989. «A regional climate model for the western United States». *Climatic change*, vol. 15, p. 383-422.
- Domonkos, Peter, Jan Kysely, Katarzyna Piotrowicz, Predrag Petrovic et Tanja Likso. 2003. «Variability of extreme temperature events in South-Central Europe during the 20th century and its relationship with large-scale circulation». *International journal of climatology*, vol. 23, p. 987-1010.
- Domroes, Manfred et Attia El-Tantawi. 2005. «Recent temporal and spatial temperature changes in Egypt». *International journal of climatology*, vol. 25, p. 51-63.
- Dubrovsky, Martin. 1997. «Creating daily weather series with use of the weather generator». *Environmetrics*, vol. 8, p. 409-424.
- Ducré-Robitaille, Jean-François, Lucie A. Vincent, et Gilles Boulet. 2003. «Comparison of techniques for detection of discontinuities in temperature series». *International journal of climatology*, vol. 23, p. 1087-1101.
- Elshamy, Mohamed E., Howard S. Wheeler, Nicola Gedney et Chris Huntingford. 2006. «Evaluation of the rainfall component of a weather generator for climate impact studies». *Journal of hydrology*, vol. 326, n° 1-4, p. 1-24.
- Emori, Seita, Tooru Nozawa, Ayako Abe-Ouchi, Atusi Numaguti, Masahide Kimoto et Teruyuki Nakajima. 1999. «Coupled ocean-atmosphere model experiments of future climate change with an explicit representation of sulfate aerosol scattering». *Journal of the Meteorological Society of Japan*.
- Environnement Canada. 1997. *L'étude pan-canadienne, Tome V: Impacts et adaptation à la variabilité et au changement du climat au Québec*.

- Environnement Canada. 2004. *Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada*. «Rapport n°3, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC». Burlington, Institut national de recherche scientifique, p. 1-148.
- Environnement Canada. 2005. *Service météorologique du Canada*. En ligne. http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada_f.html. Consulté régulièrement.
- Filliben, James J. 1975. «The probability plot correlation coefficient test for normality». *Technometrics*, vol.17, n° 1, p. 111-117.
- Flato, Gregory M., Georges J. Boer, Warren G. Lee, Norm A. McFarlane, David Ramsden, M. Cathy Reader et Andrew J. Weaver. 2000. «The Canadian Centre for climate modeling and analysis global coupled model and its climate». *Climate dynamics*, vol.16, p. 451-467.
- Folland, Chris K., David J. Griggs, et John T. Houghton. 2004. «History of the Hadley Centre for climate prediction and research». *Weather*, vol. 59, n° 11, p. 317-323.
- Fortin, Vincent. 2000. *Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application*. Institut de recherche d'Hydro-Québec, Varennes.
- Fortin, Vincent. 2001. *Analyse et prévision des apports énergétiques*. Institut de recherche d'Hydro-Québec, Varennes.
- Fortin, Vincent. 2004. *SCA-7420 : Modélisation hydrologique et hydrogéologique*. Université du Québec à Montréal, Montréal.
- Foufoula-Georgiou, Efi et Dennis P. Lettenmaier. 1987. «A markov renewal model for rainfall occurrences». *Water resources research*, vol. 23, p. 875-884.
- Fowler, Hayley J., Chris G. Kilsby, Patrick E. O'Connell et A. Burton. 2005. «A weather-type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of scenarios of climatic variability and change». *Journal of hydrology*, vol. 308, n° 1-4, p. 50-66.
- Friend, Andrew D. 1998. «Parametrisation of a global daily weather generator for terrestrial ecosystem modelling». *Ecological modelling*, vol. 109, p. 121-140.

- Frigon, Anne, Daniel Caya, Michel Slivitzky et Denis Tremblay. 2002. «Investigation of the hydrologic cycle simulated by the Canadian regional Climate Model over the Québec/Labrador territory». *Advances in Global change Research (in press)*.
- Frigon, Anne, Michel Slivitzky, et Daniel Caya. 2004. *Validation de l'hydrologie du Modèle Régional Canadien du Climat sur les rivières du Québec et du Labrador*, Ouranos, Montréal.
- Fuentes, Ursula et Dietrich Heimann. 1996. «Verification of statistical-dynamical downscaling in the Alpine region». *Climate research*, vol. 7, p. 151-168.
- Gangbazo, Georges. 2004. *Gestion intégrée de l'eau par bassin versant: concepts et application*. Environnement Québec.
- Gaume, Eric. 2005. *Hydrologie*. École nationale des ponts et chaussées, chapitres 2 et 3, p. 1-93.
- Geng, Shu, F.W.T. Penning et Iwan Supit. 1986. «A simple method for generating daily rainfall data». *Agricultural and forest meteorology*, vol. 36, p. 363-376.
- GIEC. 2000. « Rapport spécial du GIEC : scénarios d'émissions », Résumé à l'intention des décideurs, Cambridge University press, UK, p. 570.
- GIEC. 2001. *Bilan 2001 des changements climatiques: les éléments scientifiques*, «Rapport du Groupe de travail I du GIEC ». Geneva (Switzerland): GIEC, 97 p.
- GIEC. 2005. *The IPCC Data Distribution Centre*. En ligne. <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/obs/cru_climatologies.html>. Consulté régulièrement.
- Gil-Alana, Luis A. 2003. «An application of fractional integration to a long temperature series». *International journal of climatology*, vol. 23, p. 1699-1710.
- Gilleland, Eric et Richard W. Katz. 2005. *Tutorial for the extremes toolkit: weather and climate applications of extreme value statistics*. En ligne. <<http://www.assessment.ucar.edu/toolkit/>>. Consulté régulièrement.
- Giorgi, Filippo. et Gary T. Bates. 1989. «On the climatological skill of a regional model over complex terrain». *Monthly weather review*, vol. 117, p. 2325-2347.
- Giorgi, Filippo et Linda O. Mearns. 1991. «Approaches to regional climate change simulation: a review». *Reviews of geophysics*, vol. 29, p. 191-216.

- Golding, Brian W. 2000. «Quantitative precipitation forecasting in the UK». *Journal of hydrology*, vol. 239, p. 286-305.
- Goldstein J., Georges E. Desrochers, Philippe Gachon, J. Milton. 2003. «Statistical Downscaling Models Robustness: A regional case study approach for Quebec». In *CMOS Congress 37th*. (Ottawa, 2-5 juin).
- Gordon, Hal B. et Siobhan P. O'Farrell. 1997. «Transient climate change in the CSIRO coupled model with dynamical sea ice». *Monthly Weather Review*, vol. 125, p. 875-907.
- Guo, Yiping F., Yongsheng Zhao et John Wang. 2002. «Numerical simulation of the relationship between the 1998 Yangtze river valley flood and SST anomaly». *Advanced in atmospheric sciences*, vol. 19, n° 3, p. 391-404.
- Hansen, James, Gary Russell, David Rind, Peter Stone, Andrew Lacis, Serge Lebedeff, Reto Ruedy et L. Travis. 1983. «Efficient three-dimensional global models for climate studies: Models I and II». *Monthly Weather Review*, vol. 111, p. 609-662.
- Hansen, James W. et Theo Mavromatis. 2001. «Correcting low-frequency variability bias in stochastic weather generators». *Agricultural and forest meteorology*, vol. 109, n° 4, p. 297-310.
- Hanson Clair et Clare M. Goodess. 2004. *Predicting Future Changes in Wind BETWLXT Technical Briefing Note 5*, Version 1. Climatic Research Unit, University of East Anglia Norwich, 27 p.
- Harmel, R. Daren et Clarence W. Richardson. 2002. «Evaluating the adequacy of simulating maximum and minimum daily air temperature with the normal distribution». *Journal of Applied Meteorology*, vol. 41, p. 744-753.
- Hayhoe, Henry N. 1998. «Relationship between weather variables in observed and WXGEN generated data series». *Agricultural and forest meteorology*, vol. 90, p. 203-214.
- Hayhoe, Henry N. 2000. «Improvements of stochastic weather data generators for diverse climates». *Climate research*, vol. 14, p. 75-87.
- Hazen, Allen. 1914. «Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply». *ASCE transactions*, vol. 77, p. 1539-1640.

- Hessami, Massoud, Taha Ouarda, Philippe Gachon, André Saint-Hilaire, F. Selva et Bernard Bobée. 2004. «Evaluation of a statistical downscaling method over several regions of eastern Canada». In *57th Canadian water resources association annual congress*. (Montreal, June 16-18).
- Hinkley, David V. 1977. «Jackknifing in unbalanced situations». *Technometrics*, vol. 19, p. 285–292.
- Hirst, A. C. et Trevor J. McDougall 1996. «Deep-water properties and surface buoyancy flux as simulated by a z-coordinate model including eddy-induced advection». *Journal of Physical Oceanography*, vol. 26, p. 1320–1343.
- Hirst, Tony. 2004. «*Model development and analysis*». Site du CSIRO Marine and Atmospheric research. En ligne. <<http://www.dar.csiro.au/analysis/index.html>>. Consulté le 15 août 2005.
- Huth, Radan, Jan Kysely, et Martin Dubrovsky. 2001. «Time structure of observed, GCM-simulated, downscaled, and stochastically generated daily temperature series». *American meteorological society*, vol. 6, p. 4047-4061.
- Hyde, Scott. 1999. *Likelihood based inference on the Box-Cox family of transformations: SAS and MATLAB programs*. Department of Mathematical Sciences. Montana: Montana State University, 37 p.
- Hydro-Québec. 2001. «Synthèse des connaissances environnementales acquises en milieu nordique de 1970 à 2000». Hydro-Québec, Montréal, 110 p.
- Hydro-Québec. 2006. «Système hydrique de la rivière Manicouagan». En ligne. <<http://www.hydroquebec.com/production/hydroelectrique/manicouagan>>. Consulté le 10 novembre 2006.
- Hydro-Québec. 2007. «Parc de production hydraulique : Churchill ». En ligne. <<http://www.hydroquebec.com/production/hydroelectrique/index.html>>. Consulté le 1^{er} avril 2007.
- Ibbitt, Richard P., R. D. Henderson, J. Copeland et D. S. Wratt. 2000. «Simulating mountain runoff with meso-scale weather model rainfall estimates: a New Zealand experience». *Journal of hydrology*, vol. 239, p. 19-32.
- Ines, A.V.M., J.W. Hansen. 2006. «Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies». *Agricultural and forest meteorology*, vol. 138, p. 44-53.

- Jasper, K., J. Gurtz et H. Lang. 2002. «Advanced flood forecasting in Alpine watershed by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model». *Journal of hydrology*, vol. 267, n° 1-2, p. 40-52.
- Jones, J. A. A., N. C. Mountain, C. G. Pilling et C. P. Holt. 2005. «Implications of climate change for river regimes in Wales – a comparison of scenarios and models». *The 4th inter-celtic colloquium on hydrology and management of water resources*, (Guimaraes, Portugal, july 11-14 2005), 10 p.
- Jones, P. G. and P. K. Thornton. 1997. «Spatial and temporal variability of rainfall related to a third-order Markov model». *Agricultural and forest meteorology*, vol. 86, n° 1-2, p. 127-138.
- Jones, P. D. and D. Lister. 2004. «The development of monthly temperature series for Scotland and Northern Ireland». *International journal of climatology*, vol. 24, p. 569-590.
- Kay, A. L., R. G. Jones, et N. S. Reynard. 2006. «RCM rainfall for UK flood frequency estimation. I: method and validation». *Journal of hydrology*, vol. 318, p. 151-172.
- Kerkhoven, E. et T. Y. Gan. 2006. «A modified ISBA surface scheme for modeling the hydrology of Athabasca river basin with GCM-scale data». *Advanced in Water Resources*, vol. 29, n° 6, p. 808-826.
- Khalili, Malika, Robert Leconte, et François Brissette. 2007. «Stochastic multi-site generation of daily precipitation data using spatial autocorrelation». Article sous presse dans *Journal of hydrometeorology*.
- Knutti, Reto, Thomas F. Stocker, Fortunat Joos et Glan-Kasper Plattner. 2002. «Constraints on radiative forcing and future climate change from observations and climate model ensembles». *Nature*, 416 p.
- Kottegoda, N. T. 1980. « Stochastic water resources technology ». The MacMillan Press Ltd, 384 p.
- Koussis, A. D., K. Lagouvardos, K. Mazi, V. Kotroni, D. Sitzmann, J. Lang, H. Zaiss, A. Buzzi et P. Malguzzi. 2003. « Flood forecasts for urban basin with integrated hydro-meteorological model ». *Journal of hydrologic engineering*, vol. 8, n° 1, p.1-11.
- Kuchar, L. 2004. «Using WGENK to generate synthetic daily weather data for modelling of agricultural processes». *Mathematics and computers in simulation*, vol. 65, p. 69-75.

- Kunstmann, Harald et Christine Stadler. 2005. «High resolution distributed atmospheric-hydrological modeling for Alpine catchments». *Journal of hydrology*, vol. 314, p. 105-124.
- Kysely, Jan. 2002. «Comparison of extremes in GCM-simulated, downscaled and observed central-European temperature series». *Climate research*, vol. 20, p. 211-222.
- Kysely, Jan et Martin Dubrovsky. 2005. «Simulation of extreme temperature events by a stochastic weather generator: effects of interdiurnal and interannual variability reproduction». *International journal of climatology*, vol. 25, p. 251-269.
- Lakshmi, Venkataraman et Joel Susskind. 1997. «Land surface hydrological processes using satellite data». *International geoscience and remote sensing symposium*, vol. 3, p. 1102-1104.
- Laprise, René, Daniel Caya, M. Giguère, G. Bergeron, H. Côté, J.-P. Blanchet, Georges J. Boer et N. McFarlane. 1998. «Climate and climate change in western Canada as simulated by the Canadian regional climate model ». *Atmosphere – Ocean*, vol. 36, n° 2, p. 119-167.
- Leander, Robert, Adri Buishand, Paul Aalders et Marcel De Wit. 2005. «Estimation of extreme floods of the river Meuse using a stochastic weather generator and a rainfall-runoff model». *Hydrological sciences journal*, vol. 50, n° 6, p. 1089-1103.
- Leconte, Robert, François Brissette, et Karine Lorrain. 2003. *Étude du changement climatique sur la distribution des crues extrêmes: méthodologie proposée et résultats préliminaire*. «Rapport final pour le Consortium Ouranos ». Montréal (Qc) : École de technologie supérieure, 70 p.
- Lee, Youngjo et John A. Nelder. 2000. «Two ways of modelling overdispersion in non-normal data». *Journal of Applied Statistics*, vol. 49, n° 4, p. 591-598.
- Lettenmaier, Dennis P., Andrew W. Wood, Richard N. Palmer, E. F. Wood et Eugene Z. Stakhiv. 1999. «Water resources implications of global warming: a US regional perspective». *Climatic change*, vol. 43, n° 3, p. 537-579.
- Loaiciga, Hugo A., Juan B. Valdes, Richard Vogel, Jeff Garvey et Harry Schwarz. 1996. «Global warming and the hydrologic cycle». *Journal of hydrology*, vol. 174, p. 83-127.

- Lofgren, Brent M. 2004. «A model for simulation of the climate and hydrology of the Great Lakes basin». *Journal of geophysical research*, vol.109.
- Lorrain, Karine. 2004. *Analyse des apports horizon 2050 pour Manic5, Churchill Falls et Caniapiscau*. «Rapport pour le Consortium Ouranos», Montréal (Qc) : Ouranos, 10 p.
- Loukas, Athanasios, Lampros Vasiliades et Nicolas R. Dalezios. 2002. «Potential climate change impacts on flood producing mechanisms in southern British Columbia, Canada, using the CGCMA1 simulation results». *Journal of hydrology*, vol. 259, n° 1, p. 163-188.
- Lye, Leonard M. 1993. «A technique for selecting the Box-Cox transformation in flood frequency analysis». *Canadian journal of civil engineering*, vol. 20, p. 760-766.
- Manabe, S., and D. G. Hahn. 1977. «Simulation of the tropical climate of an ice age». *Journal of Geophysical Research*, vol. 82, n° 27, p. 3889-3911.
- Mao, Q., S. F. Mueller et H-M. H. Juang. 2000. «Quantitative precipitation forecasting for the Tennessee and Cumberland river watersheds using the NCEP regional spectral model». *Weather and forecasting*, vol. 15, p. 29-45.
- Martins, Eduardo S. P. R. et Robin T. Clarke. 1993. «Likelihood-based confidence intervals for estimating floods with given return periods». *Journal of Hydrology*, vol. 147, p. 61-81.
- Matalas, Nick C. 1967. «Mathematical assessment of synthetic hydrology». *Water resources research*, vol. 3, p. 937-947.
- Matondo, Jonathan I. et Kenneth M. Msibi. 2004. «Evaluation of the impact of climate change on water resources in Usutu river basin, Swaziland». *UNISWA Research, Journal of agriculture, science and technology*, vol. 4, n° 2, p. 135-146.
- Mavromatis, Theo et Philip D. Jones. 1998. «Comparison of climate change scenario construction methodologies for impact assessment studies». *Agricultural and forest meteorology*, vol. 91, n° (1-2), p. 51-67.
- McBride, John L. et Elizabeth E. Ebert. 2000. «Verification of quantitative precipitation forecasts from operational numerical weather prediction models over Australia». *Weather and forecasting*, vol. 15, p. 103-121.

- McGuffie, Kendal et Ann Henderson-Sellers. 2001. «Forty years of numerical climate modeling». *International journal of climatology*, vol. 21, p. 1067-1109.
- Merritt, Wendy S., Antony Jakeman et Barry F. Croke. 2005. «Sensitivity testing of a model for exploring water resources utilisation and management options». *Environmental modeling and software*, vol. 20, p. 1013-1030.
- Michel, J. 2004. *Chapitre 5: Hydrologie statistique, Hydrologie*. Paris : École Nationale des Ponts et Chaussées, 70 p.
- Ministère des transports du Québec (MTQ). 2006. «Carte routière : Manicouagan». En ligne. <<http://www.mtq.gouv.qc.ca>>. Consulté le 1^{er} avril 2007.
- Ministère du développement durable, environnement et des parcs (MDDEP). 2002a. «L'eau, la vie, l'avenir : Politique nationale de l'eau ». En ligne. <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/politique/politique-integral.pdf>>. Consulté le 20 juillet 2006.
- Ministère du développement durable, environnement et des parcs (MDDEP). 2002b. «Portrait régional de l'eau : nord du Québec ». En ligne. <<http://www.mddep.gouv.qc.ca>>. Consulté le 1^{er} avril 2007.
- Ministère du développement durable, environnement et des parcs (MDDEP). 2002c. «Le bassin versant de la rivière Manicouagan». En ligne. <<http://www.mddep.gouv.qc.ca>>. Consulté le 11 mars 2007
- Mitchell, J. F. B., T. C. Johns, J. M. Gregory et S. F. B. Tett. 1995. «Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols». *Nature*, vol. 376, p. 501-504.
- Mitchell, P. D. 2000. *Generation of simulated daily precipitation and air and soil temperatures*. « Rapport 00-WP 234 ». Center for Agricultural and Rural Development (CARD) Publications, Iowa State University, 36 p.
- Mitchell, T. D. and P. D. Jones. 2005. «An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids». *International journal of climatology*, vol. 25, p. 693-712.
- Morin, J., Y. Benyamini and A. Michaeli. 1981. «The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile». *Journal of hydrology*, vol. 52, p. 321-335

- Morin, G. et Michel Slivitzky. 1992. «Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique: le cas de la rivière Moisie». *Revue des sciences de l'eau*, vol. 5, p. 179-195.
- Morrison, J. M. Quick et M. G. G. Foreman. 2002. «Climate change in the Fraser river watershed : flow and temperature projections». *Journal of hydrology*, vol. 263, p. 230-244.
- Mullen, S. et R. Buizza. 2001. «Quantitative precipitation forecasts over the United States by the ECMWK ensemble prediction system». *Monthly weather review*, vol. 129, p. 638-663.
- Murphy, James 1998. «An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate». *Journal of Climate*, vol. 12, p. 2256-2284.
- Musy, A. 2005. *Hydrologie générale : chapitre 3, HYDRAM*. Laboratoire hydrologie et aménagements. École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Nakicenovic Nebojsa et Rob Swart. Site du GIEC. 2000. *Special report on emissions scenario*. En ligne. <<http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/>>. Consulté été et automne 2004.
- Nakicenovic, Nebojsa, Arnulf Grübler, Stuart Gaffin, Tae Tong Jung, Tom Kram, Tsuneyuki Morita, Hugh Pitcher, Keywan Riahi, Michael Schlesinger, P. R. Shukla, Detlef van Vuuren, Ged Davis, Laurie Michaelis, Rob Swart et Nadja Victor. 2003. «IPCC SRES revisited: a response». *Energy & Environment*, vol. 14, (2&3).
- Nash, J. E. et J. V. Sutcliffe. 1970. «River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles». *Journal of hydrology*, vol. 10, n° 3, p. 282-290.
- Nations Unies. 2004. *United Nations report says world urban population of 3 billion today expected to reach 5 billion by 2030*. En ligne. <<http://www.unis.unvienna.org/unis/pressrels/2004/pop899.html>>. Consulté le 10 juillet 2005.
- Naveau, P., D. Cooley et P. Poncet. 2005. «Spatial extremes analysis in climate studies». *Extreme value analysis*, Gothenburg, Sweden.
- Nicks, Arlin D. 1975. «Stochastic generation of hydrologic model inputs». PH.D. Thesis University of Oklahoma, Norman.

- Nicks, Arlin D. et Gene A. Gander. 1994. «CLIGEN: a weather generator for climate inputs to water resources and other models». *5th International Conference on Computers in Agriculture*. Orlando, Florida. American Society of Agricultural Engineering, p. 903-909.
- Ouranos. 2004a. *Évolution des conditions climatiques au Québec; Développement d'un scénario climatique probable utilisé à des fins de prévision de la demande électrique au Québec sur l'horizon 2030*. « Rapport pour Hydro-Québec », Montréal (Qc): Ouranos.
- Ouranos. 2004b. *S'adapter aux changements climatiques*. « Rapport du consortium Ouranos », Montréal (Qc) : Ouranos, 91 p.
- Pachauri, Rajenka, K. 2002.. «L'évolution du climat. Les phénomènes météorologiques extrêmes sont-ils un signe du changement climatique mondial?». En ligne. <<http://www.un.org/french/pubs/chronique/2002/numero4/0402cont.htm>>. Consulté le 10 juillet 2007.
- Palutikof Jean et Clair Hanson. 2003. *Variations in a UK cyclone climatology constructed from a group of nested climate models*. Geophysical Research Letters.
- Parlange, Marc B. et Richard W. Katz. 2000. «An extended version of the Richardson model for simulating daily weather variables». *Journal of applied meteorology*, vol. 39, p. 610-622.
- Perovich, Donald K. 2003. «Complex yet translucent: the optical properties of sea ice». *Physica B., Condensed matter*, vol. 338, p. 107-114.
- Pilgrim, David H et Ian Cordery. 1993. *Flood runoff*, Handbook of hydrology, Chapitre 9. McGraw-Hill inc.
- Pope, V., D., M. L. Gallani, P. R. Rowntree et R. A. Stratton. 2000. «The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model – HadCM3». *Climate Dynamics*, vol. 16, 123-46.
- Ressources naturelles du Canada. 2002. «*Les ressources naturelles du Canada*». En ligne. <http://www.nrcan-rncan.gc.ca/media/archives/newsreleases/2002/2002133a_f.htm>. Consulté le 15 avril 2006.
- Ressources naturelles du Canada. 2004. «*Aperçu national des impacts potentiels*». En ligne. <http://adaptation.nrcan.gc.ca/posters/teachers/over_f.asp>. Consulté le 15 avril 2006.

- Richardson, Clarence W. 1981. «Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation». *Water resources research*, vol. 17, p. 182-190.
- Richardson, Clarence W. et D. A. Wright. 1984. «WGEN: a model for generating daily weather variables». *US Department of agriculture, Agricultural research service*, ARS-8, p. 83.
- Robertson, K. A., D. J. Dupuis et B. L. Jones. 2006. «An extreme value analysis of advanced age mortality data». *North American actuarial journal*, à paraître, accepté le 15 mars 2006.
- Schemeiser, B. 1979. «Generations of variates from distribution tails». *Operations research*, vol. 28, p. 1012-1017.
- Schwarz, Harry E. 1977. «Climatic change and water supply – How sensitive is the Northeast? ». Chapter 7 in *Climate, Climatic Change and Water Supply*, sous la direction de Panel on Water and Climate, Geophysics Study Committee, Geophysics Research Board, Assembly of Mathematical and Physical Sciences et National Research Council. National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada. 2003. «*Le rendement du Canada 2003*». En ligne. <http://www.tbs-sct.gc.ca/report/govrev/03/cp-rc2_f.asp>. Consulté le 16 avril 2006.
- Semenov, Mikhail A. and Elaine M. Barrow. 1997. «Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios». *Climatic Change*, vol. 35, p. 397-414.
- Semenov, Mikhail A, Roger J. Brooks, Elaine M. Barrow et Clarence W. Richardson. 1998. «Comparison of WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates». *Climate research*, vol. 10, p. 95-107.
- Semenov, Mikhail A. and Roger J. Brooks. 1999. «Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain». *Climate research*, vol. 11, p. 137-148.
- Singh, Bhawan. 2003. *GÉO 2122: Climatologie*. Université de Montréal, Département de géographie, Montréal.

- Skiles, J. W. et Clarence W. Richardson. 1998. «A stochastic weather generation model for Alaska». *Ecological modelling*, vol. 110, n° 3, p. 211-232.
- Srikanthan, Ratnasingham et Tom McMahon. 2001. «Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 5, n° 4, p.653-670.
- Statistique Canada. 2004. « *Le territoire : températures à la hausse* » En ligne. <http://142.206.72.67/01/01b/01b_002a_f.htm>. Consulté le 20 avril 2006.
- Tapsoba, Dominique. 2004. SCA-7420 : *Modélisation hydrologique et hydrogéologique*. Université du Québec à Montréal, Montréal.
- Taulis, Mauricio E. et Mark W. Milke. 2005. «Estimation of WGEN weather generation parameters in arid climates». *Ecological modelling*, vol. 184, p. 177-191.
- Valdés, Juan B., Rafael S. Seoane, et Gerald R. North. 1994. «A methodology for the evaluation of global warming impact on soil moisture and runoff». *Journal of hydrology*, vol. 161, p. 389-413.
- Vogel, Richard M. 1986. «The probability plot correlation coefficient test for the normal, lognormal, and Gumbel distributional hypotheses». *Water resources research*, vol. 22, n° 4, p. 587-590.
- Von Storch, Hans, Eduardo Zorita et Ulrich Cubasch. 1993. «Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime». *Journal of climate*, vol. 6, p. 1161-1171.
- Warren, Fiona J. 2004. *Climate change impacts and adaptation program: a Canadian perspective*. Ressources naturelles du Canada, 201 p.
- Whetton, Penny. 2001. *Methods used to prepare the ranges of projected future change in Australian region temperature and precipitation*. CSIRO Atmospheric Research, 4 p.
- Wikipedia. 2005. « *Smallwood reservoir* » En ligne. <http://en.wikipedia.org/wiki/smallwood_reservoir>. Consulté le 19 octobre 2006.

- Wilby, Robert. L. et Christian W. Dawson. 2004. *Using SDSM version 3.1 - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts*. A consortium for the application of Climate Impact Assessments (ACACIA), Canadian Climate Impacts Scenarios (CCIS) and Project and Environment Agency of England and Wales, 67 p.
- Wilks, Daniel. S. 1998. «Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model». *Journal of hydrology*, vol. 210, p. 178-191.
- Wilks, Daniel. S. 1999a. «Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models». *Agricultural and forest meteorology*, vol. 93, n° 3, p. 153-169.
- Wilks, Daniel. S. 1999b. «Simultaneous stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation at multiple sites in complex terrain». *Agricultural and forest meteorology*, vol. 96, p. 85-101.
- Wilson, Larry L., Dennis P. Lettenmaier et Eric Skyllingstad. 1992. «A hierarchical stochastic model of large-scale atmospheric circulation patterns and multiple station daily precipitation». *Journal of geophysical research*, vol. 97, p. 2791-2809.
- Wood, Andrew. W., Lai-yung R. Leung, V. Rao Sridhar et Dennis P. Lettenmaier. 2004. «Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs». *Climatic Change*, vol. 62, p. 189-216.
- Woolhiser, David A. et José Roldan. 1982. «Stochastic daily precipitation models. 2. A comparison of distributions of amounts». *Water resources research*, vol.18, p. 1461-1468.
- Yevjevich, Vujica. 1972. «Stochastic processes in hydrology». *Water resources publications*, Colorado, USA.
- Yoshikane, Takao, Xieyao Ma, Fujia Kimura et Masahiro Hara. 2005. «Regional climatic simulation for hydrological model using WRF model around Yellow River basin». WRF/MM5 Users' Workshop.
- Young, Forrest W. 1968. «TORSCA-9: An IBM 360/75 FORTRAN IV Program for Nonmetric Multidimensional scaling». *Journal of Marketing Research*, vol.5, p. 319-321

- Yu, Zhongbo, Mercedes. N. Lakhtakia, Brenton M. Yarnal, Richard A. White, Douglas A. Miller, Brent Frakes, Eric J. Barron, Christopher Duffy et Franklin W. Schwartz. 1999. «Simulating the river basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system». *Journal of hydrology*, vol.218, p. 72-91.
- Zhang, Qing., Bhawan Singh, Sébastien Gagnon, Jean Rousselle, Noël Evora et Steven Weyman. 2004. «The application of WGEN to simulate daily climatic data for several canadian stations». *Canadian water resources journal*, vol. 29, n° 1, p. 59-72.
- Zhang, L. and V. P. Singh. 2005. «Frequency analysis of flood damage». *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 10, n° 2, p. 100-109.